

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Química

**SIMULACIÓ D'UN FORN DE COMBUSTIÓ I
DESENVOLUPAMENT DEL CORRESPONENT SISTEMA
D'ENTRENAMENT D'OPERADORS (OTS)**



Memòria i Annexos

Autor: Antonio Hinojo Ramírez
Director: Moisès Graells Sobre
Convocatòria: Juny 2018

Resum

Històricament, les indústries químiques han patit nombrosos accidents que posaven en perill la mateixa instal·lació i la seguretat dels seus treballadors, així com també la seguretat de la població i la preservació del medi ambient. Per això, una de les demandes del sector ha estat formar els operadors amb l'objectiu de minimitzar aquests riscos. Una de les operacions amb un risc més elevat és el cas dels forns de combustió. Aquests fan ús de combustible per escalfar un corrent de procés qualsevol i una mala operació pot provocar greus accidents. Per tal de formar adequadament aquests treballadors existeixen simulacions, les anomenades OTS (*Operator Training Simulator*).

Aquest projecte consisteix en la simulació en dinàmic d'un forn de combustió en AspenHysys i la seva connexió amb la interfície gràfica. L'eina que s'utilitza per a mostrar l'estat de planta és el software *Inprocess Instructor Station* (IIS) proporcionat per l'empresa *Inprocess Technology And Consulting Group*, la qual ha facilitat la informació necessària del forn i que posteriorment comercialitzarà el producte resultant d'aquest projecte a diferents indústries del sector.

Aquesta interfície permet la interacció entre l'usuari i la simulació i la seva configuració està realitzada per suportar la majoria de simuladors comercials, representant una pantalla similar a la real, incloent-hi el control de vàlvules, alarmes i controladors.

Resumen

Históricamente, las industrias químicas han sufrido numerosos accidentes que ponían en peligro la propia instalación y la seguridad de sus trabajadores, así como también la seguridad de la población y la preservación del medio ambiente. Por ello, una de las demandas del sector ha sido formar los operadores para minimizar estos riesgos. Una de las operaciones con un mayor riesgo son los hornos de combustión. Estos hacen uso de combustible para calentar un corriente cualquiera y una mala operación puede provocar graves accidentes. Para formar adecuadamente estos trabajadores, existen simulaciones, las llamadas OTS (*Operator Training Simulator*).

Este proyecto consiste en la simulación en dinámico de un horno de combustión en AspenHysys y su conexión con la interfaz gráfica. La herramienta que se utiliza para mostrar el estado de la planta es el software *Inprocess Instructor Station* (IIS) proporcionado por la empresa *Inprocess Technology And Consulting Group*, la cual ha facilitado la información necesaria del horno y que comercializará el producto resultante de este proyecto a diferentes industrias del sector.

Esta interfaz permite la interacción entre el usuario y la simulación y su configuración está realizada para poder soportar la mayoría de simuladores comerciales, representando una pantalla similar a la real, permitiendo el control de válvulas, alarmas y controladores.

Abstract

Throughout history, chemical industries have had many accidents, jeopardizing the installation and the security of the workers, as well as the population security and the environment preserve. For that reason, one of the sector request has been to form operators to minimize that risks. One of the most dangerous operations is a fired heater. These units use fuel to heat a process flow rate and a wrong operation can cause huge accidents. For teaching these workers right, there are simulations which are called OTS (Operator Training Simulator).

This project consists of an any dynamic fired heater simulation using AspenHysys and its connection with a graphic user interface. The tool used to display the plant state is the software Inprocess Instructor Station (IIS) obtained from the company Inprocess Technology and Consulting Group. This company has provided the information about the heater and is which will trade the final product of this project to different industries.

This interface allows the interaction between the user and the simulation and its configuration is done to support the main commercial simulators, displaying a window which is similar to the real one, controlling valves, alarms and controllers.

Agraïments

En primer lloc, agrair al Dr. Moisès Graells la possibilitat de realitzar aquest projecte, per haver-me guiat durant la seva realització així com per confiança que va dipositar en mi en recomanar-me a l'empresa *Inprocess Technology And Consulting Group*.

Per altra banda, m'agradaria agrair a l'empresa els coneixements que m'han proporcionat i que m'han permès aprendre el funcionament, tant de l'operació realitzada com dels softwares involucrats en la seva simulació.

Finalment, un fort agraïment a tots els meus amics i família que m'han donat el suport necessari per poder continuar endavant en els moments de flaqueza.

Glossari

ACKN	Acknowledge, reconeixement d'alarmes.
AI (Instrument)	Indicador d'anàlisi.
C_v	Coefficient de flux. Relaciona la caiguda de pressió a través de la vàlvula amb el cabal.
FAR	Fatal accident rate.
FIC	Flow instrument controller.
GUI	Graphical user interface, Interfície gràfica d'usuari.
Inprocess	Nom utilitzat per fer referència a l'empresa Inprocess Technology And Consulting Group.
HMI	Human-machine interface.
IIS	Inprocess Instructor Station, Estació d'instructor d'Inprocess. Software de connexió amb Hysys.
K_p	Constant proporcional d'un controlador PID.
LATCH	Circuit electrònic biestable.
LEL	Lower explosive limit, límit inferior d'inflamabilitat. Concentració mínima de gas a partir de la qual el gas pot encendre .
LKP	Equació d'estat de Lee-Kesler-Plocker.
NOR	Porta lògica OR negada.
OLE	Object Linking and Embedding. Incrustació i enllaç d'objectes.
OP	Output. Sortida del controlador.
OPC	OLE pel control de procés.
OPCClient	Part del sistema OPC encarregat de connectar-se a amb la interfície d'usuari.
OPCServer	Part del sistema OPC encarregat de connectar-se a amb la planta o simulació.
OR	Porta lògica. La seva sortida és certa sempre i quan alguna entrada ho sigui.
OTS	Operator Training Simulator, Simulació per a l'entrenament d'operadors.

- P** Proporcional. Controlador amb control proporcional.
- PFD** Process Flow Diagram, Diagrama de flux de procés.
- PI (Instrument)** Proporcional Integral. Controlador amb control proporcional i integral.
- PIC** Pressure instrument controller. Controlador de pressió.
- PID** Proporcional Integral Derivatiu. Controlador amb control proporcional, integral i derivatiu.
- PI (instrument)** Pressure Indicator. Indicador de pressió.
- PR** Equació d'estat de Peng-Robinson.
- PV** Process Variable. Variable de procés.
- SCADA** Supervisory Control And Data Acquisition, Control supervisor i adquisició de dades.
- SP** Set-point. Valor de consigna.
- SRK** Equació d'estat de Soave-Redlich-Kwong.
- STD** Estàndard.
- T_d** Temps derivatiu. Paràmetre característic del control derivatiu d'un controlador PID.
- T_i** Temps integral. Paràmetre característic del control integral d'un controlador PID.
- TIC** Temperature Instrument Controller. Controlador de temperatura.
- TI (instrument)** Temperature Indicator. Indicador de temperatura
- TRIP** Alarma de desconexió automàtica.
- US GPM** Galons per minut. Unitats americanes per indicar el cabal.
- ε** Diferència entre el valor PV i el SP.

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	IV
GLOSSARI	V
1. INTRODUCCIÓ	5
1.1. Simulació de processos.....	5
1.1.1. Què és un sistema?	5
1.1.2. Model	6
1.1.3. Camps d'aplicació	7
1.2. Operator Training Simulator (OTS).....	8
1.2.1. Fases per a l'elaboració d'una OTS	9
1.3. Objectius del treball.....	10
1.4. Abast del treball.....	11
2. ANÀLISI DEL PROBLEMA	12
3. ESTUDI DEL SISTEMA	14
3.1. Fonaments del sistema.....	14
3.2. Característiques del sistema.....	17
4. DIAGRAMA DE PROCÉS DEL SISTEMA (PFD)	20
5. MODELITZACIÓ I SIMULACIÓ	22
5.1. Propietats.....	22
5.1.1. Selecció de components	22
5.1.2. Selecció del paquet termodinàmic	25
5.1.3. Reaccions.....	28
5.2. Simulació en estat estacionari.....	29
5.2.1. Línia de combustible	31
5.2.2. Línia d'aire	32
5.2.3. Línia de procés	33
5.3. Simulació en dinàmic (llaç obert)	34
5.3.1. Entrada de gas al sistema	34

5.3.2.	Línies de cremadors.....	38
5.3.3.	Línies de pilots	39
5.3.4.	Línia d'aire i de procés.....	39
5.3.5.	Fired Heater.....	40
5.4.	Control del procés.....	48
5.4.1.	Nivell de camp	49
5.4.2.	Nivell de control	57
5.4.3.	Sistemes de protecció	76
5.4.4.	Nivell supervisor	80
6.	VALIDACIÓ DEL MODEL	89
6.1.	Pertorbacions.....	89
6.2.	Reiniciar el sistema	90
7.	INTERFÍCIE D'USUARI	92
7.1.	Què és un OPC?.....	92
7.2.	Inprocess Instructor Station.....	94
7.3.	Comunicació entre AspenHysys i IIS.....	95
7.4.	Elaboració de l'esquema de la planta (GUI)	101
7.5.	Validació de la connexió i del comportament del sistema	110
7.5.1.	Connexions	110
7.5.2.	Control de les alarmes.....	112
7.5.3.	Engegar el forn	112
7.6.	Conversió del projecte a arquitectura Client – Servidor	113
7.6.1.	Arxiu Client	113
7.6.2.	Arxiu Servidor	113
8.	DOCUMENTACIÓ DE L'OTS	114
8.1.	Exercici 1: Cas en estat estacionari.....	115
8.2.	Exercici 2: Canvi en el SP de la temperatura de sortida	116
8.3.	Exercici 3: Canvi en la temperatura d'entrada del corrent de procés	116
8.4.	Exercici 4: Canvis en el cabal de procés.....	117
8.5.	Exercici 5: Pèrdues de calor	117
8.6.	Exercici 6: Canvi de cabal de combustible	118
8.7.	Exercici 7: Canvi en l'apertura del 'damper'	118
8.8.	Exercici 8: Cremadors.....	119
8.9.	Exercici 9: Reinici del sistema	119

9. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	121
10. ANÀLISI ECONÒMICA	123
10.1. Costos de personal	124
10.2. Costos de hardware	124
10.3. Costos de software	125
10.4. Altres costos.....	125
CONCLUSIONS	127
BIBLIOGRAFIA	129
ANNEX A: SIMULACIÓ EN VMGSIM	131
A1. Simulació en estat estacionari.....	131
A2. Simulació en estat dinàmic (llaç obert)	131
A3. Conclusions de la simulació amb VMGSim	137

1. Introducció

1.1. Simulació de processos

1.1.1. Què és un sistema?

Un sistema es pot definir com un conjunt d'elements units que interaccionen. Tots aquests elements tenen una funció concreta que, globalment, permeten el correcte funcionament del conjunt.

Els elements que formen un sistema vénen condicionats per l'objectiu o l'abast del projecte de simulació, ja que el sistema estudiat pot formar part d'un altre més ampli. Per exemple, el sistema a estudiar en aquest projecte és un forn de combustió, el qual es troba en un sistema més ampli corresponent a tota la planta industrial i, pel fet que no és l'objecte d'estudi, els elements externs al forn no formen part del nostre sistema.

1.1.1.1. Tipus de sistema

Les característiques del sistema real que es volen estudiar condicionaran el tipus de simulació que es desenvoluparà. Per tant, convé fer una classificació dels sistemes d'acord amb els aspectes que condicionaran la seva anàlisi posterior. Per fer la classificació, cal considerar tres aspectes importants:

- Sistema estàtic i sistema dinàmic: Un sistema és estàtic quan les seves variables no varien al llarg del temps, és a dir, quan el sistema pot romandre igual independentment del temps en funcionament. Això significa que el sistema es troba en estat estacionari. De forma contrària, un sistema és dinàmic quan els valors d'alguna de les variables evoluciona amb el temps.
- Sistema determinista i sistema no determinista: Un sistema és determinista quan cap de les seves variables depèn d'un component aleatori. En aquesta situació, el comportament del sistema està determinat un cop s'hagin definit les condicions inicials i les relacions que existeixen entre els seus components. En el cas contrari, un sistema és no determinista quan alguna de les seves variables es comporta de forma aleatòria i, per tant, amb les condicions inicials i les equacions que les relacionen no és suficient per simular el comportament del sistema. En aquesta situació, la simulació necessitarà termes probabilístics que permetin predir de forma aproximada el comportament de la realitat.
- Sistema continu i sistema discret: Els sistemes continus són aquells on les variables d'estat canvien de forma contínua al llarg del temps, mentre que els sistemes discrets varien de forma instantània el valor d'alguna variable. A causa de la complexitat d'alguns sistemes, existeix la

possibilitat que coexisteixin variables amb ambdós comportaments, en aquest cas, s'haurà de considerar quin conjunt de variables és més representatiu del sistema per poder classificar-lo.

1.1.2. Model

Un model és la representació d'un sistema. Aquest model permet representar el comportament d'aquest sistema amb l'objectiu de predir, comprendre, experimentar o dissenyar-lo

Per poder estudiar aquest sistema, la forma idònia seria experimentar sobre ell, però aquest fet no sempre es pot dur a terme, per les característiques del mateix sistema:

- Si és necessari dissenyar el sistema, aquest encara no existeix per poder experimentar.
- Existeixen sistemes que, tot i existir, no pot experimentar-se amb ells (sistemes financers, borsaris...).
- Experimentar sobre el sistema real pot implicar una despesa econòmica, logística i/o de temps inviable.

En tots els casos nomenats anteriorment, caldrà comprendre el funcionament del sistema per poder representar-lo de la forma més acurada possible.

1.1.2.1. Tipus de model

Per a la representació d'un sistema existeixen dos tipus de models possibles: els models físics i els models matemàtics.

Els primers són els que estan formats per una estructura material i unes característiques similars a les del sistema real. Un exemple a la indústria d'aquest tipus de model són les plantes pilot, les quals mitjançant una instrumentació reduïda permet dissenyar, experimentar i predir el comportament del sistema desitjat, sense els inconvenients que implica realitzar aquesta operació a gran escala.

Un model matemàtic representa un sistema mitjançant relacions numèriques entre les seves variables. Aquestes variables i relacions poden ser modificades per estudiar les reaccions i comportaments d'un sistema. En funció de la complexitat del model, aquest es pot resoldre de forma analítica en cas de ser senzill, o mitjançant una simulació numèrica en el cas contrari.

Cada tipus de model té una sèrie d'avantatges i inconvenients respecte l'altre. Per un costat, els models físics permeten experimentar de forma real amb un sistema, la qual cosa comporta que el sistema pugui originar una situació de perill, tal com passaria amb el sistema real. Per l'altre costat, un model matemàtic permet aproximar el comportament d'un sistema mitjançant relacions matemàtiques, amb l'inconvenient que el sistema no existeix realment i pot tractar-se d'un model amb simplificacions. Tot

i això, el fet de no existir pot ser alhora un avantatge, ja que, tot i portar a terme accions que podrien comprometre la seguretat, res pot acabar en una situació de perill.

1.1.2.2. Necessitat d'una simulació

Tal com s'ha comentat amb anterioritat, s'haurà de fer servir una simulació quan el model matemàtic que el representa és d'una alta complexitat i resoldre'l de forma analítica resulta una feina de gran esforç. Les causes que poden implicar aquesta complexitat són:

- Als sistemes continus és freqüent que algunes variables representin el canvi de velocitat d'unes altres. Aquesta relació es representa matemàticament mitjançant equacions diferencials. Si el sistema és suficientment complex, aquestes equacions poden ser no lineals, les quals poden implicar una resolució complexa o impossible de forma analítica.
- En els sistemes no deterministes existeixen factors aleatoris que només poden ser representats mitjançant l'estadística. En aquests casos, la resolució analítica passa a ser complicada degut a la presència de distribucions de probabilitat o d'altres factors probabilístics.

1.1.3. Camps d'aplicació

La simulació de models basats en sistemes reals impliquen la resolució de sistemes d'equacions complexos i, com a conseqüència, la realització d'un elevat nombre de càlculs. Per aquest motiu, aquest tipus de simulacions necessiten potents eines de càlcul com són els ordinadors. Aquesta potència, afegida al gran desenvolupament de softwares dissenyats per a la simulació, han permès que aquest tipus de modelització esdevingui molt estesa. Alguns dels camps on s'aplica la simulació són:

- Sistemes d'espera
- Comunicacions: Correus, telèfons, xarxes d'informació, etc.
- Disseny de línies de muntatge
- Instal·lacions complexes (industrials, aeroespacials, etc.)
- Determinació de regles de programació de la producció
- Disseny de plantilles, assignació de treballadors a llocs de feina, etc.
- Localització d'instal·lacions com magatzems, vehicles, etc.
- Anàlisi de projectes.
- Gestió d'estoc
- Anàlisi d'inventaris

Un dels camps més coneguts de la simulació és l'aviació, on els pilots s'enfronten per primer cop al pilotatge mitjançant una simulació d'un avió real. Aquesta simulació té la funció essencial de

capacitar a la tripulació en procediments normals, anormals i d'emergència abans i durant el vol, podent dur a terme innumerables situacions com falles en els sistemes electrònics, pèrdues de potència, vents de cua entre altres, els quals no es podrien dur a terme de forma segura en una aeronau real.(1) (2)

1.2. Operator Training Simulator (OTS)

Un camp similar on les simulacions són importants és a les plantes industrials. Tal com succeeix a l'aviació, l'encarregat de fer servir una part concreta de la planta, tot i tenir la formació teòrica, no pot posar en pràctica els seus coneixements directament sobre el sistema real, a causa de la perillositat que podria implicar aquest fet. És per això que es presenta un forat formatiu que ha de quedar complet mitjançant una simulació matemàtica del procés.

Aquesta simulació, igual que en el cas anterior, té com a objectiu la formació dels operadors, proporcionant-los de la capacitat en procediments normals o excepcionals, permetent dur a terme innumerables situacions que en un sistema real podrien comprometre la seguretat global de l'aparell o, fins i tot, del personal de la planta industrial.

Aquestes simulacions són les anomenades Simulacions d'entrenament d'operadors (*Operator Training Simulator*, OTS).

Les OTS són sistemes informàtics basats en una simulació dinàmica d'un sistema industrial que està formada pels diferents elements:

- Software de simulació en dinàmic
- Model del procés
- Interfície d'usuari
- Control del sistema

1.2.1. Fases per a l'elaboració d'una OTS

Per a la elaboració d'una OTS cal realitzar una sèrie d'etapes, tal i com es mostra en el diagrama de blocs adjunt a la **Figura 1**.

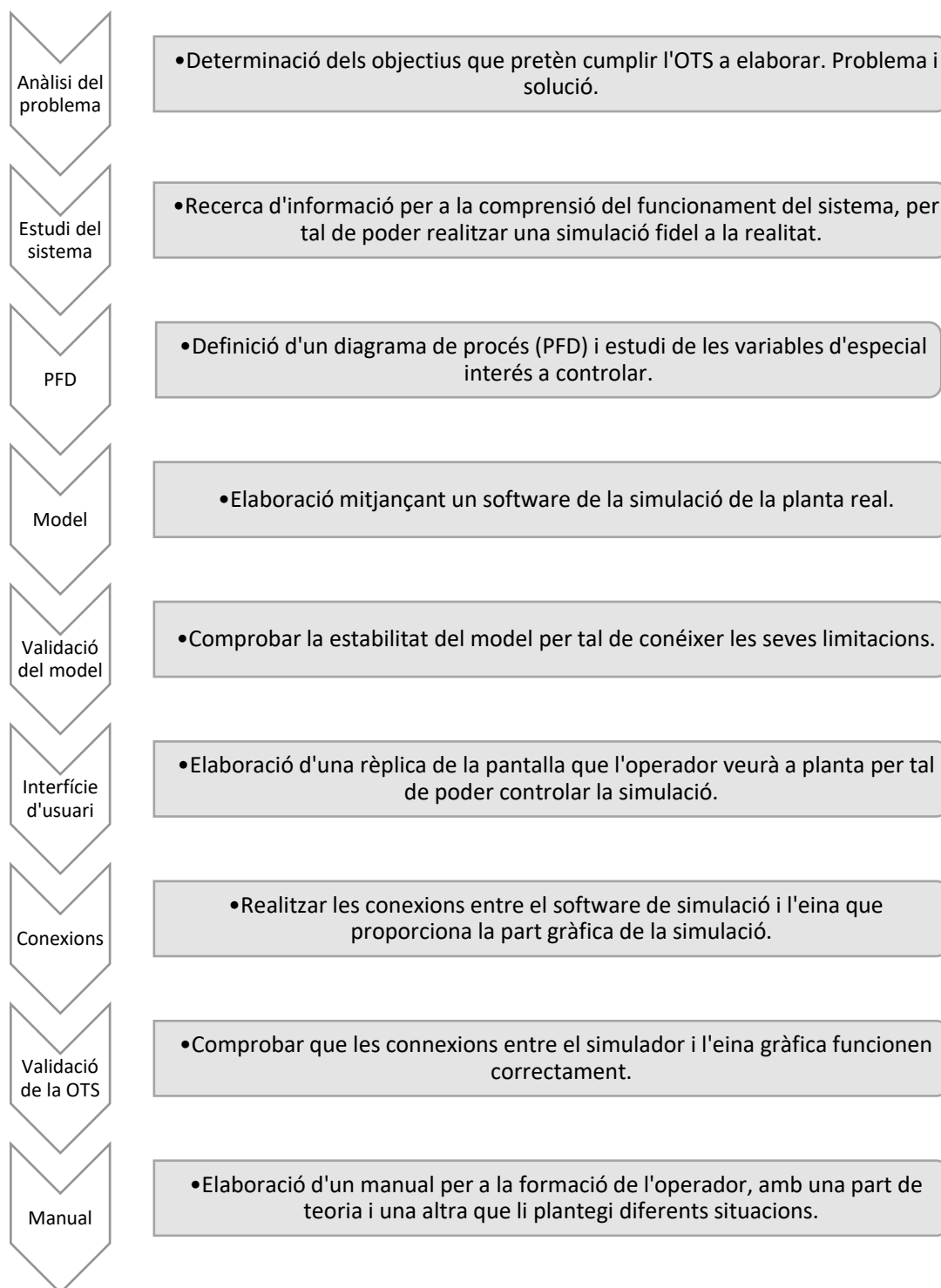


Figura 1: Etapes necessàries per a la realització d'un sistema OTS. (Font pròpia)

1.3. Objectius del treball

Per tant, amb tota la informació mostrada anteriorment, el present treball té com a objectiu la modelització d'un forn de refineria per l'elaboració d'una simulació per l'entrenament d'operadors (OTS). A causa de la diversitat de softwares que es troben en l'actualitat en el mercat, és necessari realitzar una eina suficientment versàtil com per connectar-se a qualsevol simulador. Per a poder realitzar dita simulació, s'emprarà el software AspenHysys per sol·licitud del client i l'eina *Inprocess Instructor Station* per a la connexió entre el model del sistema i la part gràfica que visualitzarà l'usuari. Aquesta darrera eina és proporcionada per l'empresa *Inprocess Technology And Consulting Group* (a partir d'ara anomenada simplement Inprocess).

Un dels propòsits del projecte és realitzar el model en dinàmic per permetre a l'operador interaccionar amb la planta simulada i observar els canvis que pateixen els diferents paràmetres a controlar. Perquè l'operador pugui interaccionar amb la planta tal com ho faria amb la planta real, és necessari l'ús d'una interfície gràfica (GUI). La combinació d'aquesta interfície amb el model simulat és el que s'anomena OTS i la que permet entrenar i conèixer millor el funcionament d'una operació unitària o planta abans de treballar directament sobre la real. D'aquesta forma, es poden preparar situacions a la simulació que permetran a l'operari saber actuar quan s'hi trobi a la planta real. Per al control d'aquest forn, s'utilitzaran diferents indicadors i controladors per informar de la situació mitjançant una interfície gràfica i que permetran actuar sobre diferents vàlvules de la planta per aconseguir un funcionament estable.

Finalment, l'OTS no és una eina senzilla de fer servir i, per aquest motiu, és necessari la preparació de la documentació que permeti ensenyar el funcionament del sistema a l'usuari que la farà servir. Aquest manual ha de permetre comprendre l'operació unitària a estudiar, en aquest cas un forn de combustió, i guiar a l'usuari durant el seu aprenentatge mitjançant una sèrie de problemes proposats que, un cop resolts, li hauran permès comprendre les conseqüències de cadascuna de les seves accions.

Com a resum, els objectius del treball són:

- Realitzar la simulació en estat dinàmic d'un forn de combustió industrial en llaç obert.
- Incorporar un sistema de control en llaç tancat a la simulació.
- Verificar l'estabilitat del model matemàtic utilitzat al ser pertorbat.
- Realitzar una interfície gràfica versàtil amb la capacitat de connectar-se a qualsevol simulador mitjançant una connexió OPC.
- Preparar la documentació necessària per a comprendre el sistema i el funcionament de l'OTS.

1.4. Abast del treball

Les OTS tenen com a objectiu la formació dels usuaris. Tot i això, existeixen diferents tipus de nivells formatius per a l'usuari. Primerament, l'usuari necessita conèixer de forma general el comportament de l'operació unitària i posteriorment, es pot representar la planta en la qual treballarà per instruir-lo de forma més específica.

El present projecte té objectiu realitzar el primer tipus d'OTS i, per tant, no es representa una planta real. La finalitat d'aquesta OTS és la de formar a qualsevol operari en el comportament d'aquest tipus d'aparells, entenent les diferents respostes que hauria de tenir qualsevol forn de qualsevol planta amb unes característiques semblants.

El sistema que cal preparar ha de correspondre a un forn de combustió de convecció natural i fent ús només de la zona radiant. Les parts del forn que han de representar-se són els cremadors, els pilots, l'aire, la línia de procés i finalment la sortida de l'aire del sistema. És a dir, només es representa en aquest treball el sistema corresponent al forn, sense considerar la procedència dels cabals.

La simulació pot realitzar-se amb diferents softwares comercials, tot i que les exigències dels clients i les mancances de temps fan que s'utilitzi AspenHysys. Tot i això, en futurs projectes pot ser necessari utilitzar altres softwares per a la simulació per exigències del client. Per aquest motiu, la realització de la interfície gràfica es prepara amb la finalitat de poder connectar-se a qualsevol simulador comercial, ja que la tecnologia de comunicació que s'utilitza és OPC.

Com que el resultat d'aquest projecte està destinat a una formació inicial a una operació unitària, ha d'haver-hi una major quantitat d'informació a la pantalla que visualitzarà l'usuari per poder arribar a comprendre tot el que està succeint a la instal·lació. Per aquest motiu, a més de les variables que es mostren i es permeten manipular a les plantes reals, és necessari afegir-ne d'altres que, o bé no cal mostrar perquè poden ser llegides mitjançant altres variables (calor bescanviada), o bé són variables impossibles de manipular per l'usuari a la realitat (temperatura ambient). Per altra banda, informació que pugui ser específica d'un sol forn no s'incorpora, com per exemple la composició del producte que s'escalfa, ja que es tracta de realitzar un producte capaç de ser comercialitzat a la quantitat més gran d'empreses possibles.

Per altra banda, aquesta OTS ha de permetre a l'alumne poder introduir-se en el camp de la interacció home-màquina (HMI), disposant de tots els controls que normalment tenen els forns de combustió. Es permet el control de variables com cabals, temperatures o pressions mitjançant l'ús de controladors. A més a més, el sistema disposa d'alarmes d'avís per informar l'usuari de l'estat de la planta. Si finalment alguna variable pren un valor considerat perillós, el sistema ha de ser capaç d'aturar el seu funcionament (Alarma TRIP).

2. Anàlisi del problema

Les plantes industrials històricament han estat llocs amb un alt risc d'accidents, creant fins i tot indicadors per permetre comprendre aquest nivell de perillositat com poden ser la FAR (*Fatal Accident Rate*). Indicadors com aquests permeten conèixer quan perillós és estar en una planta industrial concreta i conscienciar la presa d'accions que permetin millorar la seguretat de tothom. A continuació, a la **Figura 2** es mostra l'evolució del nombre d'accidents mortals a Espanya els darrers anys.

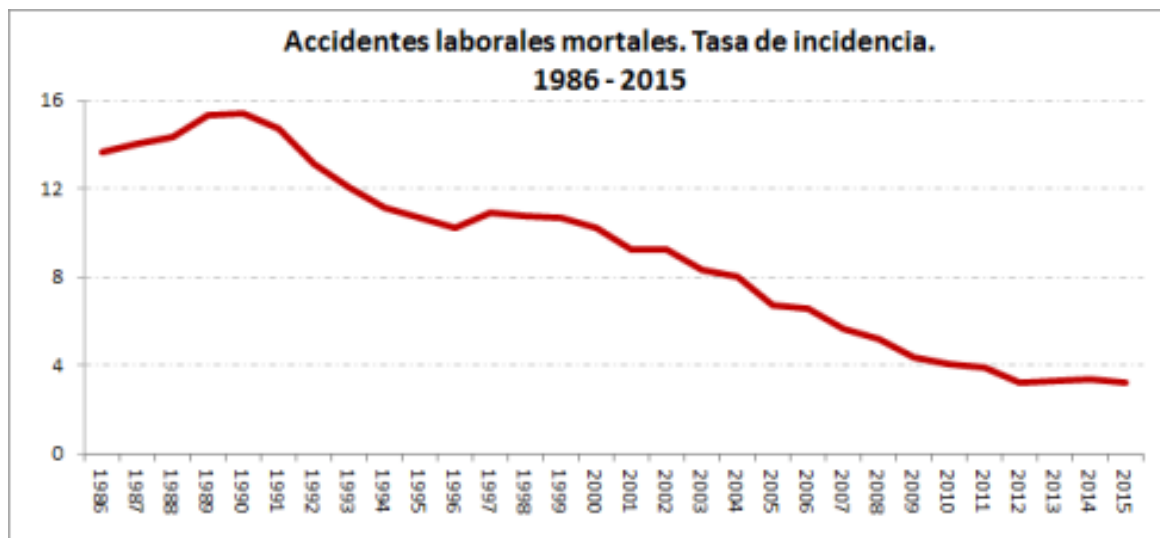


Figura 2: Evolució del nombre d'accidents mortals a Espanya en el període de 1986-2015 (3)

En el gràfic anterior, es pot observar com existeix una elevada tendència a què el nombre d'accidents mortals disminueixi i és en aquest punt on les tecnologies han permès avançar, juntament amb altres mesures com la prevenció, en aspectes de seguretat, incloent-hi sofisticats sistemes de detecció i d'aturada que intervenen en moments de perillositat. Tot i això, no sempre és possible que un sistema de seguretat intervingui i, alhora, el cost d'aturar una planta per una mala presa de decisions també és molt elevat.

És per aquests dos motius, seguretat i costos, que és cada cop més necessari assegurar la correcta formació del personal de planta perquè coneguin clarament el funcionament de tot el sistema. La formació teòrica ha estat un gran avanç en aquesta qüestió, però no és suficient per assegurar que un operador sap actuar davant d'una situació d'emergència, la qual no ha vist mai abans i, per tant, és necessari complementar aquesta formació teòrica amb una part «experimental». Aquesta és difícil portar-la a terme, en primer lloc, perquè s'estaria posant en risc la seguretat per ensenyar a actuar davant d'aquestes situacions i, en segon lloc, perquè s'hauria d'aturar de treballar i produir per poder fer servir la planta com a camp d'entrenament. Per tot això, una simulació matemàtica de la planta és

la solució a un problema formatiu existent i que augmenta i millora la seguretat sense interferir en el normal funcionament del sistema real.(4)

En el cas que ens ocupa, un forn de combustió és una operació unitària complexa, on s'ha de cremar combustible, la qual cosa augmenta la perillositat a l'hora de treballar. Per aquest motiu, és necessari ampliar la formació dels operadors i personal de planta per assegurar una correcta actuació davant una situació d'emergència. Una OTS, tal com s'ha comentat anteriorment és una opció segura que permet que l'usuari experimenti i aprengui el funcionament de la planta i que entengui les conseqüències de qualsevol acció o decisió que prengui.

3. Estudi del sistema

3.1. Fonaments del sistema

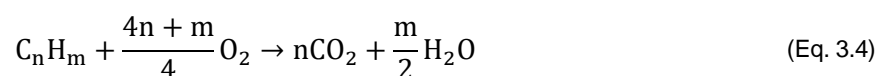
El sistema que és necessari simular és un forn de combustió. Aquesta operació unitària es basa principalment en dos aspectes: Combustió i transferència de calor.

La combustió és la reacció exotèrmica, és a dir, que emet energia. Aquesta és la que ha de ser transferida cap al corrent de procés que es desitja escalfar. Aquesta reacció es porta a terme als cremadors del forn, els quals reben el combustible i permeten dur a terme la combustió. Els cremadors, però, no poden començar la reacció per si sols sense una energia d'activació. Aquesta energia és proporcionada per uns petits cremadors anomenats pilots.

Un cop el combustible reacciona amb l'oxigen, es desprèn energia i gasos de combustió. Les reaccions es poden simplificar de la següent forma tal com es mostra a les reaccions (Eq. 3.1) (Eq. 3.2) (Eq. 3.3).



Quan la combustió succeeix en un ambient molt ric en oxigen, tot el monòxid de carboni i l'hidrogen reaccionen, donant lloc a la reacció mostrada a (Eq. 3.4). Aquesta reacció es anomenada combustió perfecta.



Depenent d'aquesta quantitat d'oxigen, la quantitat que s'obté de cada producte variarà i, per tant, s'ha de contemplar que els productes de la reacció seran una barreja de tots els productes de les reaccions mostrades a (Eq. 3.1), (Eq. 3.2) i (Eq. 3.3) en diferents proporcions.

La reacció desprèn una gran quantitat d'energia, la qual s'haurà de transferir al producte desitjat. Existeixen tres formes de transferir calor: Radiació, convecció i conducció.

- **Radiació:** Es tracta d'un tipus de transferència de calor que pren protagonisme en presència d'elevades temperatures, ja que el mecanisme que implica la transferència de calor és la radiació electromagnètica, la qual es desplaça a la velocitat de la llum. A baixes temperatures, la radiació emesa és molt dèbil i pràcticament es pot negligir el seu efecte. En un forn de combustió, aquesta forma de transferència d'energia pren molta rellevància a causa de les altes temperatures que es poden assolir.
- **Convecció:** Es tracta de la transferència de calor a través d'un fluid que està en contacte amb una superfície a diferent temperatura. Existeixen dos mètodes convectius, la convecció forçada i la convecció natural. La convecció forçada implica el moviment del fluid mitjançant una força externa com una bomba o un ventilador, mentre que a la convecció natural, el fluid es mou a través dels canvis de densitat que pateix al canviar la seva temperatura. Al forn, aquest tipus de transferència de calor pren una importància inferior a la radiació. Tot i això, la quantitat d'energia que pot transferir pot arribar a ser important, tot i que en alguns casos no s'aprofita. Cal esmentar també que la convecció també intervé a les pèrdues de calor que pot haver en el forn, les quals s'han de dimensionar i incloure a la simulació.

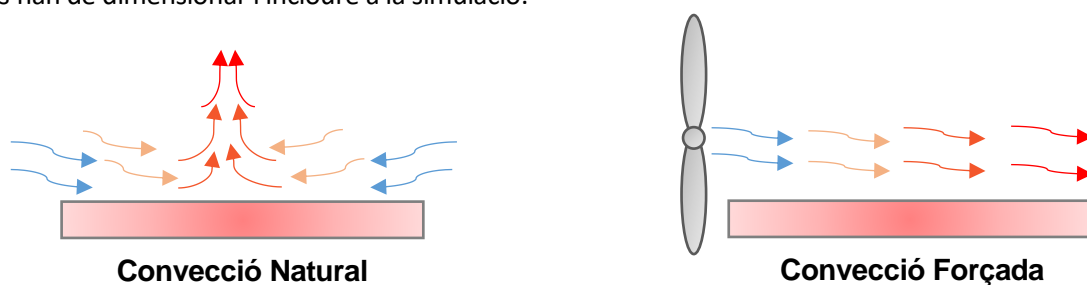


Figura 3: Comparació del moviment del fluid a la convecció natural i a la convecció forçada (Font pròpia)

- **Conducció:** Es tracta de la transferència de calor que succeeix a través d'un cos amb dos punts a diferents temperatures. En el forn, aquest tipus de transferència de calor succeeix a les parets del forn, per on existeixen pèrdues de calor que cal considerar. (5)

Un forn de combustió disposa de tres zones principals on intercanviar calor: La zona radiant, la zona convectiva i l'economitzador, tal i com es mostra a la **Figura 4**.

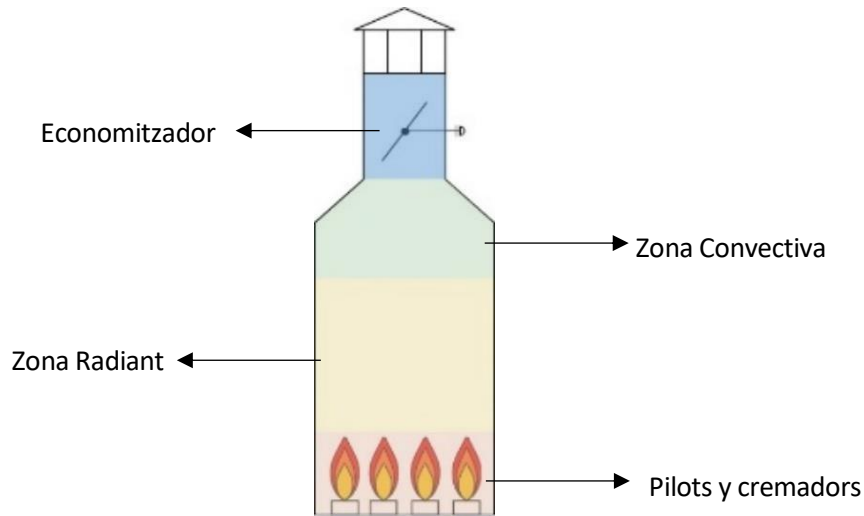


Figura 4: Esquema de les diferents zones d'un forn de combustió (Font pròpia)

A cada zona, la transferència de calor és diferent. A la zona radiant, predomina la transferència de calor mitjançant la radiació, ja que és on més a prop es troba la flama, la qual emet les ones electromagnètiques que transfereixen l'energia.

La zona convectiva és la que aprofita la temperatura dels fums de combustió i on la transferència de calor predominant és la convecció. Finalment l'economitzador és la part final del forn que intenta aprofitar l'energia que pugui restar en els fums després de la zona convectiva.

El corrent de procés pot realitzar diferents passades a través de cada zona, amb l'objectiu d'intentar aprofitar la màxima quantitat d'energia possible.(6)

3.2. Característiques del sistema

Tal com s'ha explicat en apartats anteriors, el forn a simular no existeix a la realitat. Tot i això, l'empresa *Inprocess Technology And Consulting Group* proporciona una sèrie d'indicatius sobre les característiques del forn. A continuació, a la **Taula 1** es mostren aquestes característiques.

Taula 1: Característiques del forn que ha de ser simulat

Característiques del forn	
Forma	Tub vertical
Tipus de convecció	Natural
Nombre de passades per la zona radiant	2
Nombre de passades a la zona convectiva	0
Nombre de passades per l'economitzador	0
Nombre de pilots	4
Nombre de cremadors	4
Combustible	Gas Natural
Excés d'aire	20% d'excés

A més a més, s'ha d'incorporar la lògica de seguretat que protegeix i atura el forn davant de diferents situacions de perill durant el seu funcionament. Les accions que fan activar aquest sistema de seguretat són les mostrades a la **Taula 2**.

Taula 2: Condicions que activen la parada d'emergència del forn

Situació	Valor crític
Falla de cremadors	Més d'un
Falla de pilots	Més d'un
Pressió de la línia de pilots elevada	Superior a 172,148 kPa
Pressió de la línia de pilots baixa	Inferior a 83,8954 kPa
Pressió de la línia de cremadors elevada	Superior a 259,022 kPa
Pressió de la línia de cremadors baixa	Inferior a 83,8954 kPa
Temperatura de la zona convectiva elevada	Superior a 926,67 °C
Pressió al forn elevada	Superior a 80,1723 kPa
Es tanca l'accés de gas als cremadors	—
Es tanca l'accés de gas als pilots	—
Cabal de procés baix	Inferior a 7,5584 STD m ³ /s
Temperatura de sortida de procés massa elevada	Superior a 382,22 °C
Concentració de gasos al forn perillosa	Superior a 20 %LEL

Per altra banda, el sistema disposa d'un sistema lògic que permet conèixer en tot moment la situació de la planta. Cal destacar que per arrancar el forn és necessari complir una sèrie de requisits que assegurin que la situació és segura. Aquests estats són els que es mostren a continuació:

- **Preparat per la purga:** En primer lloc, per a la posada en marxa del forn cal realitzar una purga. Això es realitza bàsicament perquè és necessari assegurar que a l'interior del forn no existeixen una acumulació de gasos que posi en perill la seguretat de la planta. Aquest estat ve a indicar que es compleixen les condicions per a poder purgar. Aquestes condicions són que no hi hagi flama al forn, pressions baixes a les línies de combustible, vàlvules de gas tancades i sortida de fums del forn oberta.
- **Purga en procés:** Quan les condicions anteriors són certes, el forn està preparat per executar la purga. En aquest procés, es permet circular aire per l'interior i assegurar que no hi ha restes de combustible a l'interior del forn.
- **Purga Completa:** Si no hi ha presència de gas a l'interior en finalitzar la purga, el forn es troba purgat i preparat per encendre.
- **Purga Fallida:** De forma contrària al cas anterior, si després d'executar la purga encara hi ha restes de combustible a l'interior suficientment elevades, la purga falla i, per tant, és necessari tornar a començar el procés.
- **Pilots preparats per encendre:** En cas que la purga s'hagi realitzat de forma satisfactòria, el forn es trobarà llest per començar a funcionar. En primer lloc, cal encendre els pilots, els quals permeten posteriorment encendre la flama dels cremadors.
- **Cremadors preparats per encendre:** Quan els pilots es trobin en funcionament, el forn es trobarà en condicions per a poder encendre els cremadors.
- **Funcionament normal:** En el cas que els pilots i cremadors funcionin de forma correcta durant 10 minuts, el forn ja es pot considerar que es troba en condicions de funcionament normals.
- **Alarma del forn:** En el cas que alguna alarma de pressió, temperatura o gas s'activi o que més d'un cremador deixi de funcionar de forma correcta, el forn s'atura per qüestions de seguretat, aturant i tancant totes les vàlvules de gas, obrint alhora la sortida dels fums.
- **Mode manual/automàtic:** Tot el procés explicat en els apartats anteriors es pot realitzar de forma manual per l'usuari o bé, com que es tracta d'una seqüència, pot realitzar-se de forma automàtica. En funció de qui realitza la seqüència, el forn es troba en un estat o en l'altre.

4. Diagrama de procés del sistema (PFD)

A partir de les característiques esmentades anteriorment, és necessari en primer lloc partir d'un diagrama de procés que representi el sistema a simular. Un diagrama de procés representa de forma gràfica i simbòlica les activitats d'un procés, incloent-hi els principals elements que el formen.

A la **Figura 5** es pot observar el diagrama de procés (PFD) del forn corresponent al sistema a estudiar.

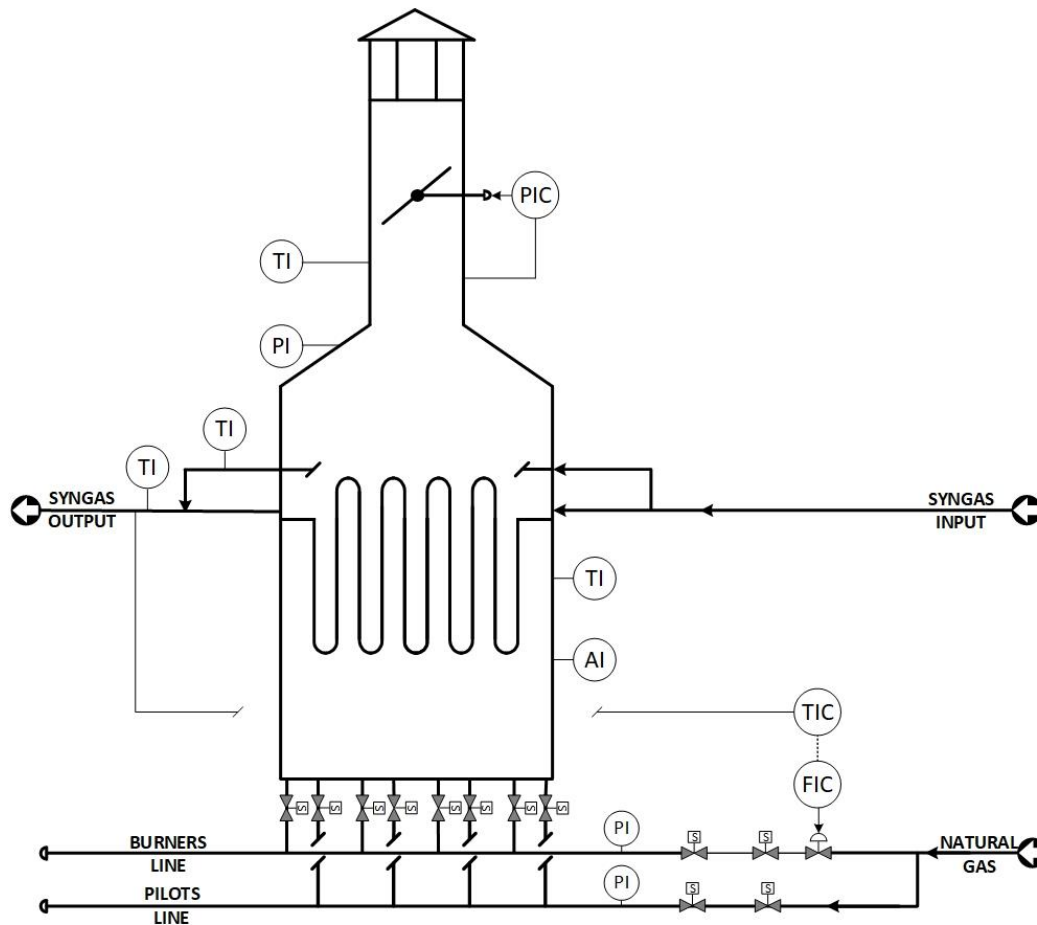


Figura 5: Diagrama de procés del sistema a simular









Com es pot observar, existeixen dues línies principals, una línia per al combustible (*Natural Gas*) i una segona línia, la de procés, la qual és el producte que es desitja escalfar (*Syngas Input/Output*). La línia de gas natural es bifurca en dues de diferents, la de cremadors (*Burners Line*) i la de pilots (*Pilots Line*). La línia de pilots correspon a una línia amb una capacitat de transport molt inferior, com que els pilots necessiten significativament una quantitat menor de combustible que els cremadors. Ambdues línies contenen vàlvules solenoide que permeten o impedeixen el pas, sense permetre cap regulació. És

necessari comentar que, per seguretat, existeixen dues vàlvules d'aquest tipus a cada línia, per assegurar que, en cas que una falli, sempre es pugui aturar el funcionament de la planta.

Cal destacar també que la línia de cremadors, a més a més de disposar de les electrovàlvules, també conté una vàlvula per controlar el cabal principal de gas que accedeix al forn. Aquesta vàlvula es troba controlada per un controlador de cabal que permetrà el pas de combustible en funció de la temperatura de sortida de la línia de producte (*Syngas Output*). Alhora, cada pilot i cada cremador disposen d'una electrovàlvula individual, per poder encendre'ls de forma ordenada i evitar que el gas accedeixi de cop al forn, posant en perill la seguretat per acumulació de combustible.

Finalment, el procés necessita una instrumentació que indiqui i/o controli el procés d'alguna forma. Tota la simbologia del diagrama de procés es mostra a la **Taula 3**.

Taula 3: Simbologia del diagrama de procés

Símbol	Nom de l'indicador o controlador
	Indicador de Temperatura (<i>Temperature Indicator</i>)
	Indicador de Pressió (<i>Pressure Indicator</i>)
	Indicador d'Anàlisi. En aquest cas, indicador de %LEL al forn
	Controlador de Temperatura (<i>Temperature Controller</i>)
	Controlador de Pressió (<i>Pressure Controller</i>)
	Controlador de Flux (<i>Flow Controller</i>)
	Vàlvula solenoide o electrovàlvula
	Vàlvula pneumàtica

Cada instrument dels mostrats en el diagrama de procés s'encarrega de mostrar o controlar una variable en especial del sistema. Aquestes variables són les que es consideren que són especialment crítiques, ja que poden ocasionar una parada d'emergència (veure **Taula 2**) o bé poden mostrar informació d'interès a l'usuari.

5. Modelització i simulació

Tal com s'ha explicat a l'apartat **Tipus de sistema**, existeixen diversos tipus de models. Tot i això, en el cas d'aquest projecte, la simulació matemàtica és la que més ajusta a les necessitats explicades. A més a més, degut a les característiques que necessita una OTS, el model ha de realitzar-se en dinàmic, amb l'objectiu de que les diferents variables evolucionin amb les pertorbacions al llarg del temps.

Al mercat actual, existeixen multitud de softwares que permeten realitzar les simulacions en dinàmic de processos industrials com el que es plantegen durant aquest document. Tot i això, l'empresa que comercialitzarà el producte demana que es realitzi en AspenHysys, a causa de la seva dominància en el mercat actual.

5.1. Propietats

5.1.1. Selecció de components

En primer lloc, és necessari introduir les propietats del propi sistema. Això són els compostos, els paquets termodinàmics i les reaccions químiques involucrades. A la **Figura 6** es pot observar aquestes propietats.

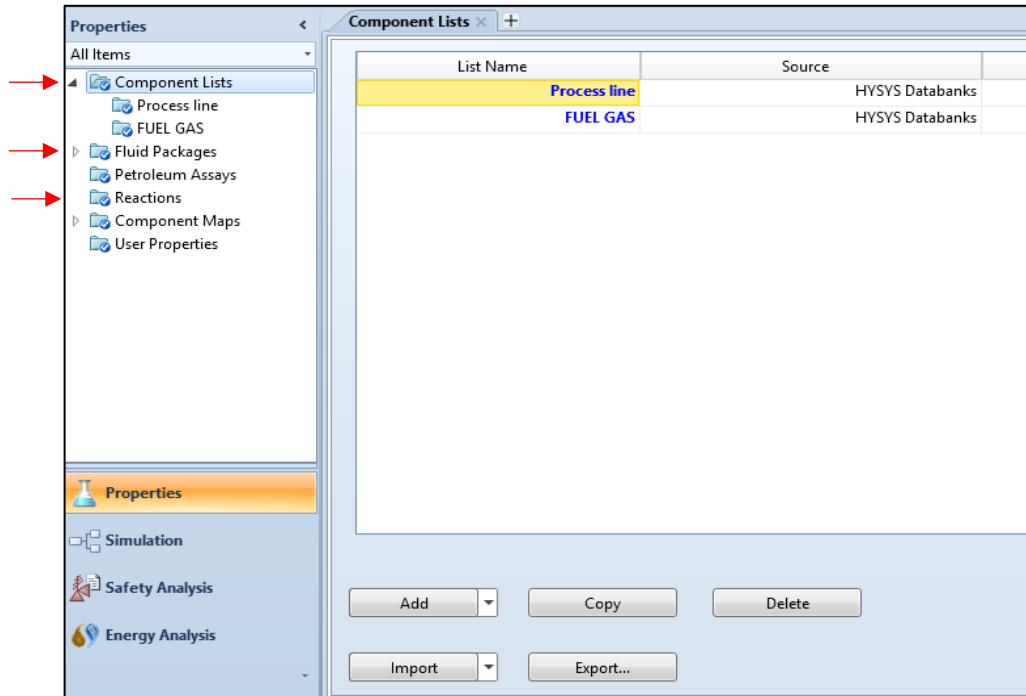


Figura 6: Pantalla d'AspenHysys per a la definició de les propietats del sistema

Tal com es pot observar, el primer que cal especificar són els components que intervenen en el procés. Com que el model és genèric i la seva funció és comprendre l'operació unitària, el corrent de procés a escalfar no és un aspecte prioritari a l'hora de realitzar el model. La composició escollida per aquest corrent és la que es mostra a la **Taula 4**.

Taula 4: Compostos que formen el corrent de procés

Llista 1: Corrent a escalfar (<i>Syngas Line</i>)
Hidrogen
Nitrogen

El motiu pel qual s'ha considerat un corrent com aquest és per la seva simplicitat, ja que, com que no és informació visible per a l'usuari de la simulació, afegir una composició més complexa complicaria la simulació de forma innecessària.

De forma contrària, la composició del gas natural és una part important a la simulació, ja que l'energia alliberada a la combustió depèn directament d'aquesta.

A continuació es mostra a la **Taula 5** la composició dels dos corrents que intervenen al procés.

Taula 5: Compostos que intervenen en la combustió

Llista 2: Corrent de combustible (<i>Natural Gas</i>)
Metà
Età
Propà
i-Butà
n-Pentà
n-hexà
Hidrogen
Nitrogen
Argó
Diòxid de carboni
Aigua
Monòxid de carboni
Oxigen

Com es pot observar, la metodologia emprada ha estat la de separar en llistes diferents els compostos en funció de la línia a la qual pertanyen. El motiu que justifica aquesta decisió és que els dos corrents no intercanvien matèria durant el procés, només energia, i per tant, és impossible que, per exemple, la línia de procés a escalfar tingui en algun moment algun compost relacionat amb la combustió. Separant en dues llistes s'aconsegueix mantenir una organització en la composició dels diferents fluxos, evitant confusions.

5.1.2. Selecció del paquet termodinàmic

El paquet termodinàmic és l'aspecte més important de tota la simulació, ja que, una mala decisió pot implicar un model massa allunyat del comportament real del sistema. És per això que cal escollir de forma molt acurada i ben justificada el paquet termodinàmic que millor pugui predir el comportament del sistema.

Com que s'han realitzat dues llistes de compostos, el software permet escollir un paquet termodinàmic (*Fluid Package*) diferent per a cada una de les llistes.

A causa de la gran quantitat de paquets termodinàmics inclosos, es decideix realitzar en primer lloc una selecció mitjançant l'assistent incorporat al software utilitzat. (7)

Aquest software, mitjançant una sèrie de preguntes sobre el procés i els components, indica una llista de paquets termodinàmics útils.

En primer lloc s'escollirà el paquet termodinàmic per a la primera llista de components: Hidrogen i nitrogen. Aquests dos compostos són apolars i es faran treballar a elevades pressions.

Si amb aquesta informació es responen les preguntes de l'assistent, s'obté com a resposta una gran quantitat de paquets útils per a la simulació d'aquesta part del procés, tal com es veu a la **Figura 7**.

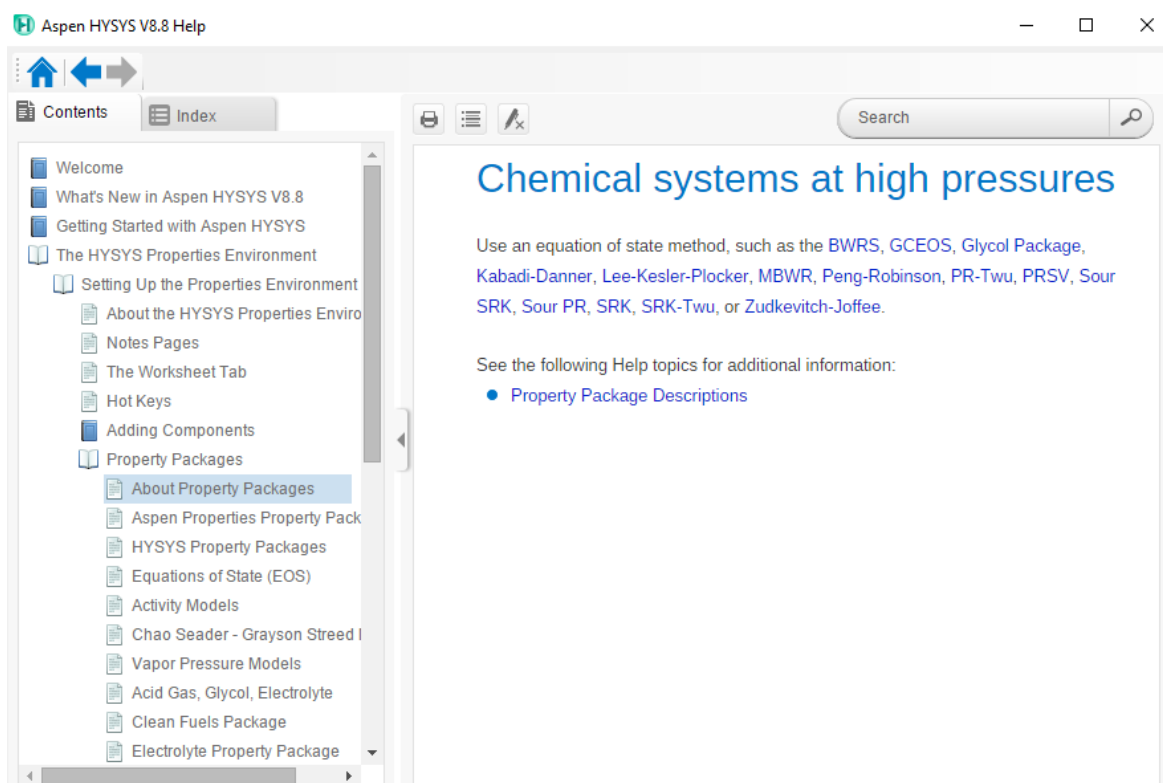


Figura 7: Paquets termodinàmics per a sistemes químics a alts pressió

Tot i això, si analitzem cadascuna de les opcions proporcionades, es pot comprovar com no totes les opcions són recomanables. A **Taula 6** es mostra el motiu de rebuig de cada paquet termodinàmic.

Taula 6: Estudi dels diferents paquets termodinàmics proposats per l'assistent incorporat al simulador AspenHysys

Paquet termodinàmic	Motiu de rebuig
BWRS	No inclou les interaccions de l' N_2 amb l' H_2
GCEOS	Model que permet introduir una equació d'estat cúbica pròpia. No útil pel tipus de sistema a representar
Glycol Package	Útil per sistemes binaris formats per trietilenglicol i aigua
Kabadi-Danner	Útil per a sistemes amb equilibri Líquid-Vapor i hidrocarburs.
Lee-Kesler-Plocker	—
MBWR	És capaç de modelitzar l'hidrogen fins a una temperatura de 127 °C.
Peng-Robinson	Ideal per a hidrocarburs
PR-Twu	Ideal per a hidrocarburs
PRSV	Ideal a pressions baixes
Sour SRK	Ideal per hidrocarburs, àcids gasosos i aigua
Sour PR	Ideal per hidrocarburs, àcids gasosos i aigua
SRK	—
SRK-Twu	Per al càlcul d'entalpies no aporta diferències amb SRK.
Zudkevitch-Joffee	Útil per a sistemes amb equilibri Líquid-Vapor

A partir de la informació mostrada a la **Taula 6** es pot observar com la llista d'opcions s'ha vist considerablement reduïda a dos paquets termodinàmics.

Donat que tots dos paquets són capaços de representar de forma correcta el sistema descrit, es pren la decisió de fer servir el paquet termodinàmic Soave-Redlich-Kwong (SRK) pels bons resultats que proporciona amb sistemes amb alt contingut en hidrogen.

Per altra banda, si realitzem el mateix estudi amb la llista de components del combustible, s'ha d'indicar a l'assistent que els components utilitzats són hidrocarburs sense compostos hipotètics ni petroli cru.

Amb aquestes característiques introduïdes, el sistema recomana tres paquets termodinàmics: Peng-Robinson, Lee-Kesler-Plocker i SRK. En aquest cas el sistema no indica cap indicador que faci pensar que un paquet ajusta millor que d'altre. Per decidir quin utilitzar, s'ha decidit fer una recerca bibliogràfica dels valors de calor específic dels diferents compostos.

En el cas del gas natural, a causa de l'alta presència de metà en el sistema es realitzarà la comparació entre els resultats del paquet termodinàmic amb els valors obtinguts de referències bibliogràfiques d'aquest compost pur. (8)

Els resultats d'aquesta comparació es poden observar a la gràfica de la **Figura 8**.

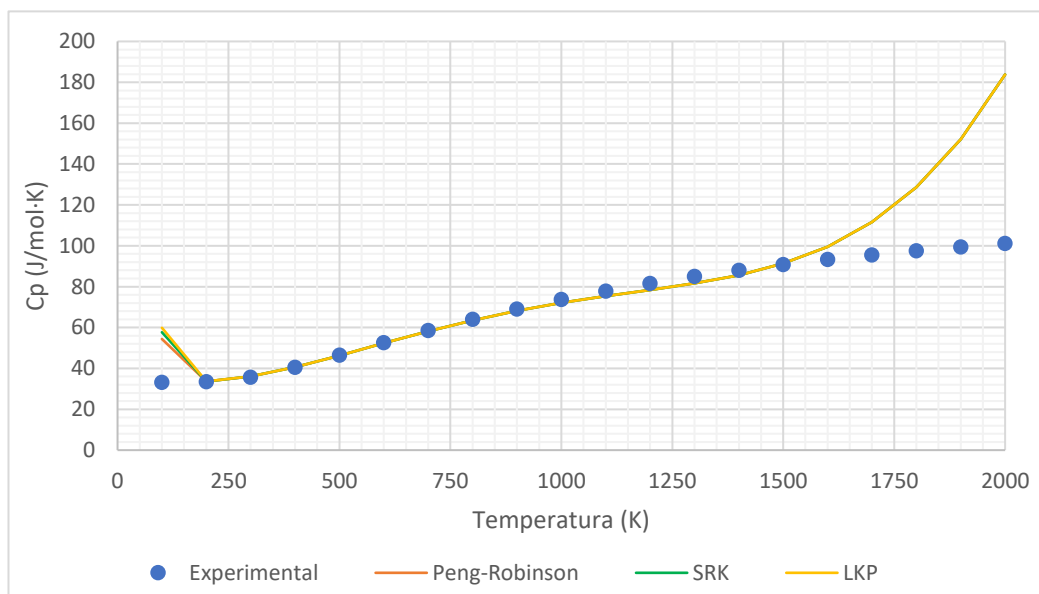


Figura 8: Comparació entre els valors de calor específic experimental i teòrics del metà (8)

Com es pot observar en el gràfic anterior, tots tres paquets termodinàmics donen un resultat semblant, amb unes diferències entre valors molt petites (inapreciables en el gràfic). Es pot apreciar com a valors de temperatura inferiors a 200 K i superiors a 1400 K, cap dels tres paquets termodinàmics dona uns resultats prou semblants a la realitat. Tot i això, en el rang de treball d'aquest projecte, els valors calculats són prou acurats.

Per tant, es pren la decisió de fer servir el paquet termodinàmic Peng-Robinson, tot i que els altres dos models aportarien bons resultats. (7)

Finalment, a la **Taula 7** es mostren els paquets termodinàmics per a cada llista.

Taula 7: Paquets termodinàmics per a la simulació del sistema

Llista 1: Corrent a escalfar	Llista 2: Corrent de combustible
<i>Soave-Redlich-Kwong (SRK)</i>	<i>Peng-Robinson (PR)</i>

5.1.3. Reaccions

Tal com s'ha comentat a l'apartat 3.1, el sistema que cal representar conté una reacció química: la combustió. El programa AspenHysys té un apartat per introduir totes aquestes reaccions, però en aquest cas, el propi mòdul que s'utilitzarà ja incorpora la modelització de la combustió i, per tant, no fa falta incorporar les reaccions involucrades en el sistema.

5.2. Simulació en estat estacionari

La informació per a simular el forn són a la **Taula 8** i són proporcionades per l'empresa que comercialitzarà el curs OTS. La informació és obtinguda de diversos projectes amb forns de característiques similars.

Taula 8: Característiques del procés per al dimensionat de la planta

Característiques amb un cabal de gas total de 400,7 kPa		
Pressió entrada combustible	3975 kPa	
Pressió entrada a línies de cremadors i pilots	1471 kPa	
Pressió de treball forn	79,13 kPa	
Pressió línia de cremadors	101,6 kPa	
Pressió línia de pilots	101,5 kPa	
Pressió aire entrada	79,15 kPa	
Pressió sortida gasos	78,08 kPa	
Pressió d'entrada de la línia de procés	12230 kPa	
Caiguda de pressió a la línia de procés	70 kPa	
Temperatura de gasos de sortida	1081 °C	
Cabal de gas/cremador	99 kg/h	
Cabal de gas/pilot	1,175 kg/h	
Caiguda de pressió al forn (línia de procés)	1,3%	
Caiguda de pressió al forn (Gasos de combustió)	0,01%	
Temperatura d'entrada Gas	25 °C	
Pèrdues de calor	Pas 1	≈ 5%
	Pas 2	≈ 5%

Per a la transferència de calor no es pot fixar un valor concret, ja que a mesura que el model va funcionant, la calor va variant. Per a poder aproximar el comportament de la simulació a la realitat, es tenen uns valors aproximats de com hauria de funcionar el forn: Amb un cabal de gas de 400,7 kg/h, la línia de procés hauria d'aproximar-se a una temperatura propera a 120 °C a la primera passada i de 210 °C a la segona. Tot i això, en estat estacionari es decideix simplificar-ho tot a una sola passada.

Per altra banda, el gas natural pot tenir composicions molt diferents en funció del proveïdor. És per això que es pren la decisió de fer servir la composició que es mostra a la **Taula 9**.

Taula 9: Composició del gas natural a utilitzar

Compost	Fracció molar
Metà	0,9614
Età	0,0197
Propà	0,0040
i-butà	0,0013
n-pentà	0,0004
n-hexà	0,0001
Nitrogen	0,0055
Diòxid de carboni	0,0076

Amb les dades mostrades a les taules anteriors, se simula l'estat estacionari de la planta. Un cop aquest sigui simulat, es procedirà a canviar la modelització a estat dinàmic.

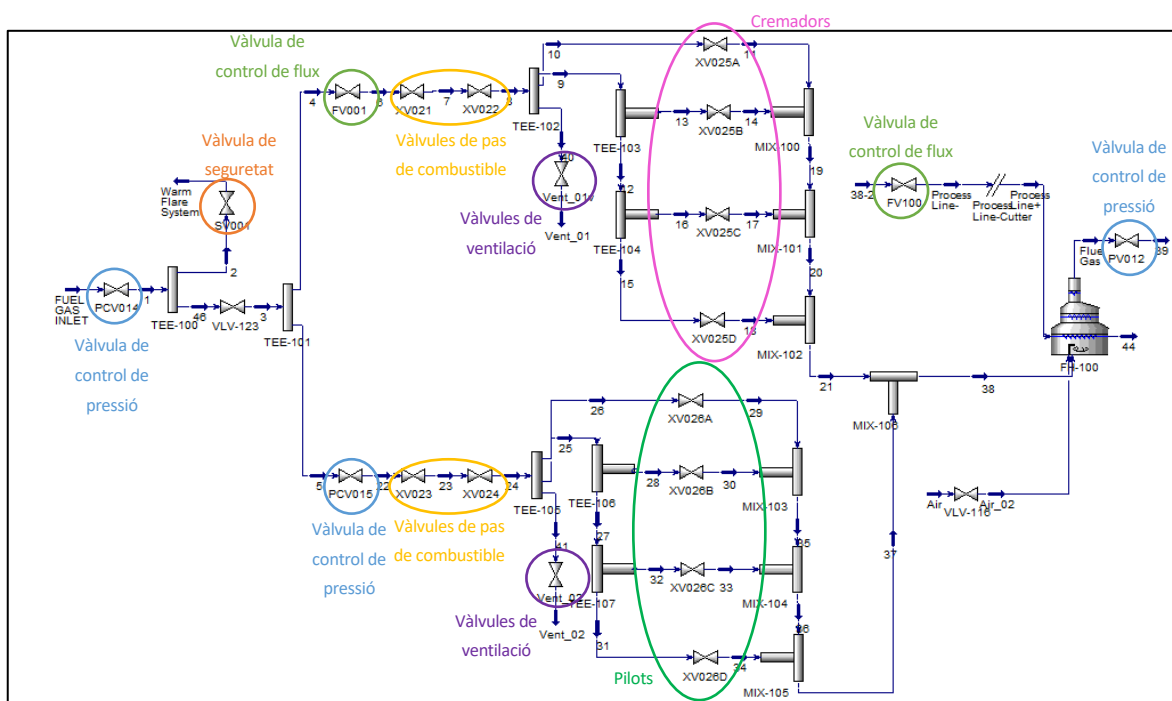


Figura 9: Simulació del sistema en estat estacionari

5.2.1. Línia de combustible

Com es pot observar a la **Figura 9**, el combustible entra a través de la vàlvula PCV014. Aquesta s'encarregarà posteriorment de controlar la pressió de tota la línia de combustible. A continuació, es pot observar un divisor. Aquest és l'encarregat de donar pas a dos línies diferents. La línia principal i la vàlvula de seguretat. Aquesta darrera s'encarrega d'extreure del sistema l'excés de combustible que genera una sobrepressió. En una situació d'operació normal, aquesta vàlvula es troba tancada. A continuació es pot observar una vàlvula secundària (VLV-123), la qual serveix per simular la caiguda de pressió entre els dos divisors. Seguidament, el cabal de combustible es separa en dos línies diferents. La primera, mostrada a la part de dalt de la figura, correspon a la línia de cremadors. Aquesta línia necessita d'una vàlvula de control de flux (FV001), la qual regularà la quantitat de combustible que passa. La sortida d'aquesta darrera vàlvula es troba connectada a dues vàlvules més. Aquestes vàlvules són solenoide i la seva funció és permetre o impedir el pas de combustible (és a dir, només tenen dues posicions, obert o tancat). Al final d'aquesta línia es poden observar quatre vàlvules en paral·lel (XV025 A/B/C/D), les quals són les encarregades de simular els cremadors. Degut a que aquest tipus d'unitat no es troben directament en el sistema perquè la combustió la realitza el mòdul del forn, aquestes vàlvules són les encarregades de simular aquests cremadors. Quan estan obertes els cremadors estan encesos i, per tant, es permet el pas de combustible cap al forn. De forma contrària, el combustible no pot accedir al forn i no és cremat.

Just a sota de tota la primera línia de cremadors es troba la de pilots, la qual té un aspecte molt similar. La principal diferència d'aquesta part del model és que el cabal no s'ha de regular directament i per tant, no necessiten un control de flux. En el seu lloc, s'utilitza una vàlvula que posteriorment s'encarregarà de controlar la pressió d'aquesta darrera línia (PCV015). A continuació, es troben les vàlvules solenoide utilitzades també per controlar el pas de combustible als pilots (XV023 i XV024). Finalment, els pilots estan simulats de la mateixa forma que els cremadors, mitjançant vàlvules solenoide (XV026 A/B/C/D).

Totes dues línies s'uneixen posteriorment en una de sola per entrar directament al forn i ser cremades amb aire.

5.2.2. Línia d'aire

El forn a simular és de convecció natural. Això vol dir, tal com es va explicar a l'apartat **Fonaments del sistema**, que el moviment de l'aire és degut als canvis de densitat que pateix amb la temperatura. Aquest comportament no es pot simular amb cap software de forma automàtica, i per tant, és necessari simular un corrent amb l'aire que haurà de reaccionar amb el combustible. La composició de l'aire utilitzat és a la **Taula 10**.

Taula 10: Composició de l'aire utilitzat a la simulació

Compost	Fracció molar
Nitrogen	0,7764
Oxigen	0,2082
Argó	0,0091
Vapor d'aigua	0,0063

Aquesta convecció natural no es pot simular directament al software i per això és necessari conèixer l'excés d'aire amb el qual normalment opera la planta. Per regular-ho és necessari fer servir una vàlvula que s'encarrega de dur a terme aquesta part de la simulació. Aquesta vàlvula no existeix en el sistema real, però és necessària per a modelitzar correctament el sistema.

5.2.3. Línia de procés

Finalment, és necessari simular el corrent que es desitja escalfar. Aquest corrent, tal com s'ha comentat a l'apartat **Selecció de components**, no és la part principal del forn ja que una variació a la composició no afectarà en el funcionament real del forn. Per tant, es designa la següent composició mostrada a la **Taula 11**.

Taula 11: Composició del corrent de procés del sistema

Composició	Fracció molar
Hidrogen	0,72
Nitrogen	0,28

A aquest corrent se'l fixa una temperatura de 25 °C, un cabal d'11530 kg/h i una pressió de 12230 kPa.

Tot i això, aquest cabal serà regulable i és necessari afegir una vàlvula de control de flux (FV100) que servirà per controlar aquest pas de matèria.

Amb totes aquestes dades el model en estat estacionari queda completament definit. Tot i això, existeixen paràmetres com les pèrdues de calor que no poden ser simulades amb el mòdul del forn en estat estacionari, i no serà fins a dinàmic quan es puguin configurar.

5.3. Simulació en dinàmic (llaç obert)

Un cop el sistema es troba simulat en estat estacionari, és moment de treballar en estat dinàmic. Un cop el sistema es troba en aquest estat de simulació, cal acabar de configurar les diferents operacions unitàries utilitzades. A continuació es mostra aquesta nova configuració per seccions.

5.3.1. Entrada de gas al sistema

Taula 12: Resum de les vàlvules utilitzades a l'entrada de gas del sistema

Element	Volum (m ³)	C _v (US GPM)	Posició Fallida	Característiques d'operació	Actuador	Pressió d'apertura (bar)	Pressió d'apertura total (bar)
PCV014	0,28	8,186	Tancat	Isopercentual	Lineal	—	—
SV001	—	—	No	Lineal	—	16,03	16,30
VLV-123	—	10 ⁴	—	—	—	—	—
FV001	0,28	8	Tancat	Isopercentual	Lineal	—	—
PCV015	0,14	0,125	Tancat	Isopercentual	Lineal	—	—
XV021/22	0,071	2489	Tancat	Lineal	Lineal	—	—
XV023/24	0,071	90	Tancat	Lineal	Lineal	—	—

En primer lloc, es configuren les vàlvules de l'entrada de combustible en el sistema (**Figura 10**):

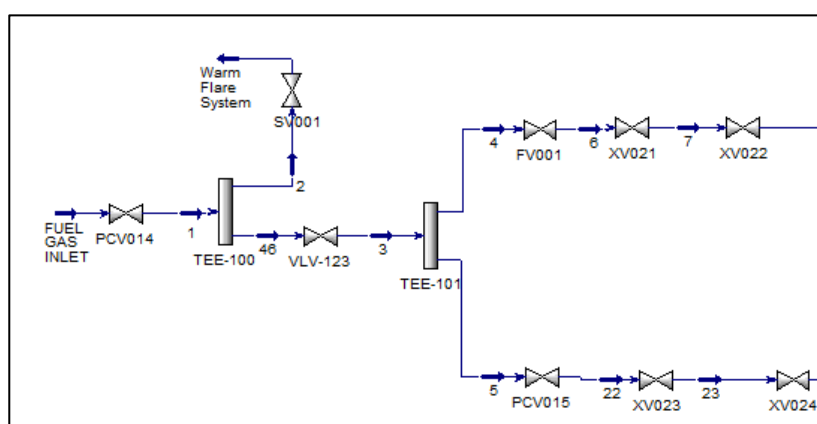


Figura 10: Línia de gas natural modelitzada a AspenHysys

S'han de considerar bàsicament cinc aspectes per modelitzar les vàlvules: El càlcul de C_v , les característiques d'operació, el volum de la vàlvula, l'actuador i la posició de fallida.

La C_v és un paràmetre de la vàlvula que permet conèixer quant cabal permet passar a través seu. A l'equació (Eq. 5.1) es mostra l'equació per al seu càlcul.

$$Q = C_v \cdot f(50\%) \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_L}} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

El software utilitzat calcula aquesta variable de forma automàtica mitjançant els valors de cabal i apertura de la vàlvula dels compostos en estat estacionari. Existeixen diversos mètodes per al càlcul d'aquesta variable, tot i que el mètode escollit per a fer el càlcul és mitjançant el model universal de dimensionament de corrents gasosos (*Universal Gas Sizing*). (9)

Per altra banda, les vàlvules tenen diverses opcions per a ser configurades. El primer que es mostra per a configurar-se són les característiques de l'apertura de la vàlvula. Existeixen quatre tipus de característiques: Lineal, d'apertura ràpida, isopercentual i específic amb taules. Aquesta darrera opció està destinada a la simulació de vàlvules amb un comportament més concret i conegut, però com que aquesta simulació no representa un forn ja existent, no es disposa de cap vàlvula que necessiti aquesta característica. Per tant, durant la modelització, es faran servir els altres tres tipus de vàlvules.

El primer tipus correspon a una vàlvula lineal, la qual proporciona una relació lineal entre la posició de la vàlvula i el cabal. Aquest tipus de vàlvula són útils per controlar nivell i certes operacions de control de flux que requereixen un guany constant.

El segon tipus de vàlvules són les d'apertura ràpida. Aquestes permeten passar un gran flux amb una petita apertura. És un comportament útil per vàlvules que estan pensades per treballar només en dues posicions: obert o tancat, ja que, encara que l'actuador no permetés obrir totalment la vàlvula, la major part del contingut podria circular.

Finalment, el tercer tipus de vàlvula són les d'apertura isopercentual. Aquestes, per a petits increments successius i iguals de grau d'apertura, produeixen un canvi de cabal proporcional al cabal que circulava abans de la variació. Són útils per a vàlvules encarregades del control de pressió.

A la **Figura 11** es pot observar com evoluciona el cabal que circula per les vàlvules en funció de l'apertura i el tipus de característica.

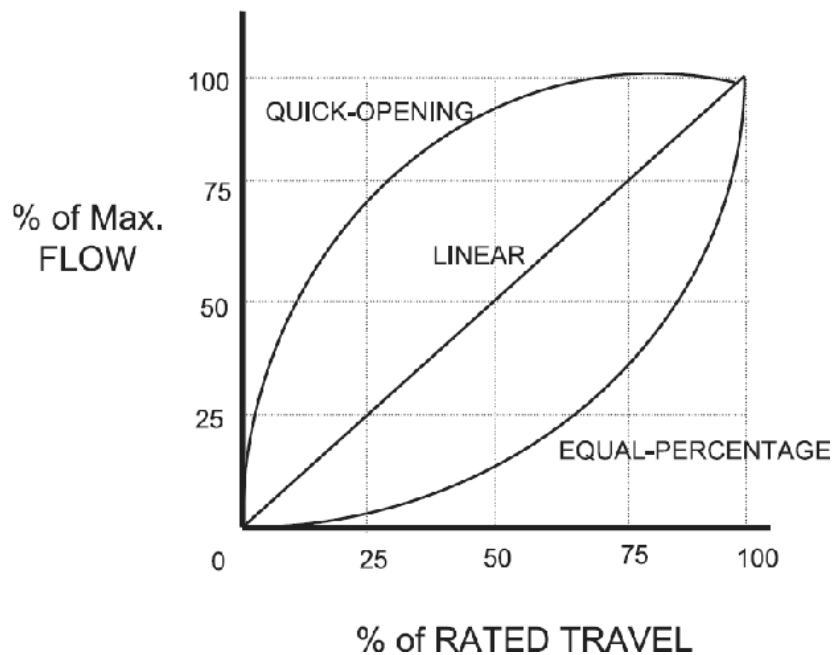


Figura 11: Representació de la quantitat de cabal que permet circular cada tipus de vàlvula en funció de l'apertura (10)

A més a més, per al càlcul en dinàmic, s'ha de considerar que la vàlvula pot tenir al seu interior una acumulació de matèria, a causa del seu volum. El càlcul de C_v es realitza amb els valors establerts a l'estat estacionari. Per últim, les vàlvules han de tenir un actuador que permet conèixer el tipus de resposta que tindrà la vàlvula davant d'un canvi en la seva apertura. Els tres tipus d'actuador són: Lineal, de primer ordre o instantani.

Per tant, coneixent aquestes condicions, es prenen les decisions per a les diferents vàlvules d'aquesta part del procés:

- **Vàlvula PCV014:** Aquesta vàlvula té com a objectiu el control de la pressió de la línia. Per aquest motiu, la seva corba d'actuació es defineix com a isopercentual (*Equal percentage*). Per altra banda, el volum de la vàlvula, que ve determinat per l'empresa, no és necessari que sigui excessivament elevat, ja que el que circularà per l'interior serà gas en tot moment. El volum que s'introdueix és de $0,28 \text{ m}^3$. Una de les característiques més importants és la seva posició en cas de fallida. Aquesta vàlvula és la que permet el pas de combustible cap al forn, i en cas d'emergència, ha de quedar tancada, evitant el pas de combustible. Per últim, es pren la decisió de fer servir un actuador sobre la vàlvula amb resposta lineal, per aconseguir una resposta proporcional.

- Vàlvula SV001: Aquesta vàlvula, tot i semblar ser igual a la resta de vàlvules, té un sistema de funcionament completament diferent. Es tracta d'una vàlvula de seguretat per a la sobrepressió que pugui haver a la línia que actua en cas de no poder mantenir-la dins dels marges de seguretat. El mòdul utilitzat per aquesta modelització és la *Relief Valve*, la qual en cas de que la pressió superi el valor límit establert, s'obre per alliberar el gas. Aquest tipus de vàlvules es comencen a obrir quan existeix un valor de pressió concret. L'altre valor que cal afegir es el valor de pressió corresponent a la vàlvula totalment oberta. Aquests valors s'han establert fent servir la informació proporcionada pel client (Veure **Figura 12**).

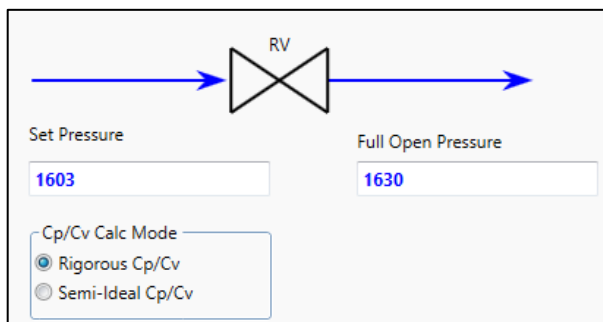


Figura 12: Configuració a AspenHysys del mòdul *Relief Valve*

- VLV-123: Aquesta vàlvula no existeix en el procés simulat. La presència permet simular la caiguda de pressió de la línia. Com que no hi ha un valor determinat per a la caiguda de pressió de la línia, es decideix utilitzar una C_v de 10^4 .
- FV001: La línia de cremadors necessita un control de cabal a la línia que permeti el pas del combustible a mesura que es necessita. Aquesta vàlvula és l'encarregada de dur a terme aquesta funció. En aquest cas, la vàlvula ha de ser configurada per tenir una operació isopercentual, tal com s'ha fet amb la de control de pressió anterior. La C_v calculada a partir dels valors en estat estacionari és de 8. Per altra banda, com que gran part del combustible circula cap als cremadors, el volum de retenció de la vàlvula utilitzada és també de $0,28 \text{ m}^3$, degut a la similitud entre el cabal total i el d'aquesta línia. L'actuador tindrà una resposta lineal i la seva posició de fallida és quedar tancada.
- PCV015: Igual que l'altra vàlvula de control de pressió, aquesta vàlvula és isopercentual, amb actuador lineal i que necessita quedar tancada en cas de fallida. Per altra banda, com que el cabal que ha de circular per la línia de pilots és significativament inferior, el volum d'aquesta vàlvula també ho ha de ser. En aquest cas la vàlvula té un volum de $0,14 \text{ m}^3$, la meitat que la resta de vàlvules principals del sistema.
- Vàlvules XV021/XV022: Aquestes dues vàlvules són les encarregades de permetre o impedir el pas de combustible a la línia de cremadors. Ambdues vàlvules són exactament iguals i és necessari que n'hi hagin dues perquè, en cas que una de les vàlvules falli, sempre es pugui tancar l'accés de combustible al forn gràcies a l'altra. En aquest cas, aquestes vàlvules han de

permetre o tallar el pas del fluid, i per tant, només tenen dues posicions possibles: oberta o tancada. És per aquest motiu que la vàlvula ha de ser d'apertura ràpida i, amb un actuator lineal i, igual que les vàlvules anteriors, amb una posició tancada en cas de fallida. Per altra banda, no necessiten un gran volum al seu interior i és per això que el seu volum de retenció és de $0,071 \text{ m}^3$. Finalment, la constant C_v de les vàlvules es calcula a partir de l'estat estacionari.

- Vàlvules XV023/XV024: La seva funció és la mateixa que les vàlvules anteriors, però permetent el pas del fluid a la línia de pilots. La seva configuració és exactament la mateixa, canviant només el valor C_v . Imposant en aquest cas la mateixa caiguda de pressió que a les vàlvules anteriors, però amb un flux molt inferior, s'obté un valor calculat també inferior. (9)

5.3.2. Línies de cremadors

En aquest apartat, es mostra la modelització de la línia de cremadors del sistema a representar. A la **Figura 13** es mostra aquesta secció del model.

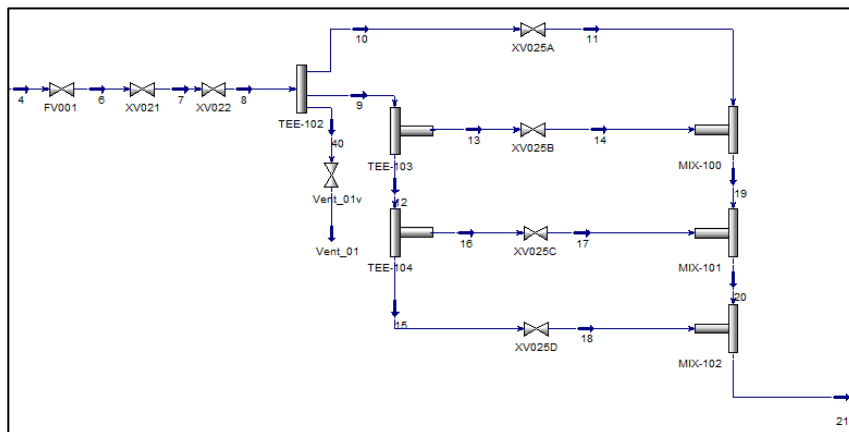


Figura 13: Secció del model corresponent a la línia de cremadors

Tal com s'ha explicat a l'apartat **Simulació en estat estacionari**, els cremadors i pilots s'han simulat amb vàlvules, les quals estan configurades de la mateixa manera. Aquestes vàlvules tenen dues posicions (obert o tancat) i, tal i com s'ha explicat amb anterioritat, es configuren amb una obertura ràpida i un actuator lineal. Per altra banda, totes aquestes vàlvules, per seguretat, en cas de trobar-se en posició de fallida necessiten quedar tancades. A més a més, el volum d'aquestes ha de ser significativament inferior a la resta de vàlvules utilitzades, ja que el cabal es redueix de forma considerable degut a la divisió en quatre corrents diferents. Per aquest motiu el volum d'aquestes vàlvules es de $0,035 \text{ m}^3$. Finalment, la C_v es calcula amb el cabal de 99 kg/h i una pressió de sortida de $79,13 \text{ kPa}$.

Per altra banda, es pot observar com existeix una vàlvula anomenada Vent_01. Aquesta vàlvula en una situació normal es troba sempre tancada. La seva funció és poder reduir la pressió en el cas que la

pressió a la línia augmenti de forma anormal. Si per algun motiu la pressió de la línia augmenta massa, la resta de vàlvules haurien d'entrar en la seva posició de fallida, quedant tancades. Aquesta vàlvula permet l'evacuació del contingut de la línia. La pressió de sortida d'aquesta vàlvula és de 85,82 kPa. Aquest valor es fixa per evitar que la pressió de la línia quedi per sota del valor inferior del rang correcte de treball.

5.3.3. Línies de pilots

Les vàlvules que simulen els pilots han de comportar-se d'igual manera que les anteriors, és a dir, mitjançant un actuador lineal, d'actuació ràpida, amb un volum de 0,035 m³ i una pressió de sortida de 79,13 kPa. Com que el cabal que ha de circular pels pilots és considerablement inferior que als cremadors, la C_v calculada serà inferior. Igual que a la part de cremadors, és necessari afegir una vàlvula per poder reduir la pressió en cas que aquesta augmenti de forma excessiva. A la **Figura 14** es pot observar aquesta secció del model.

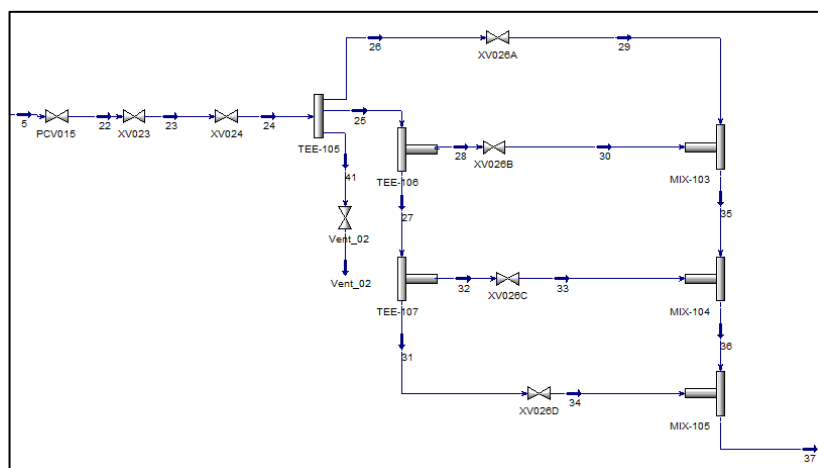


Figura 14: Secció del model corresponent a la línia de cremadors

5.3.4. Línia d'aire i de procés

La línia d'aire, tal com s'ha comentat, és l'encarregada d'introduir l'aire en el sistema i està controlada per una vàlvula que en realitat no existeix en el sistema real. És per aquest motiu que cal configurar aquesta vàlvula amb especial atenció. La C_v d'aquesta vàlvula calculada amb l'estat estacionari és de 21320 US GPM. Per altra banda, la característica d'apertura se simula ràpida, ja que inicialment l'aire entra ràpidament en el forn. Tot i això, la resposta de l'actuador se simula de primer ordre, amb l'objectiu de continuar simulant aquesta tendència ràpida que té el sistema en els primers instants d'apertura. Finalment, com que realment no existeix, no té ni volum ni posició de fallida. La secció corresponent a aquesta part del sistema a la simulació es pot observar a la **Figura 15**.

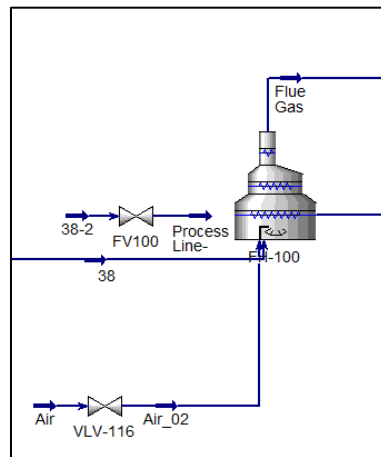


Figura 15: Secció de la simulació corresponent a la línia d'aire i de procés

5.3.5. Fired Heater

Un cop les línies han estat simulades, es procedeix a simular el forn de combustió en dinàmic. És en aquest mode de simulació on es configuren les dues passades del forn per la zona radiant. Tot i això, durant la configuració apareix el problema que es mostra a la **Figura 16**.

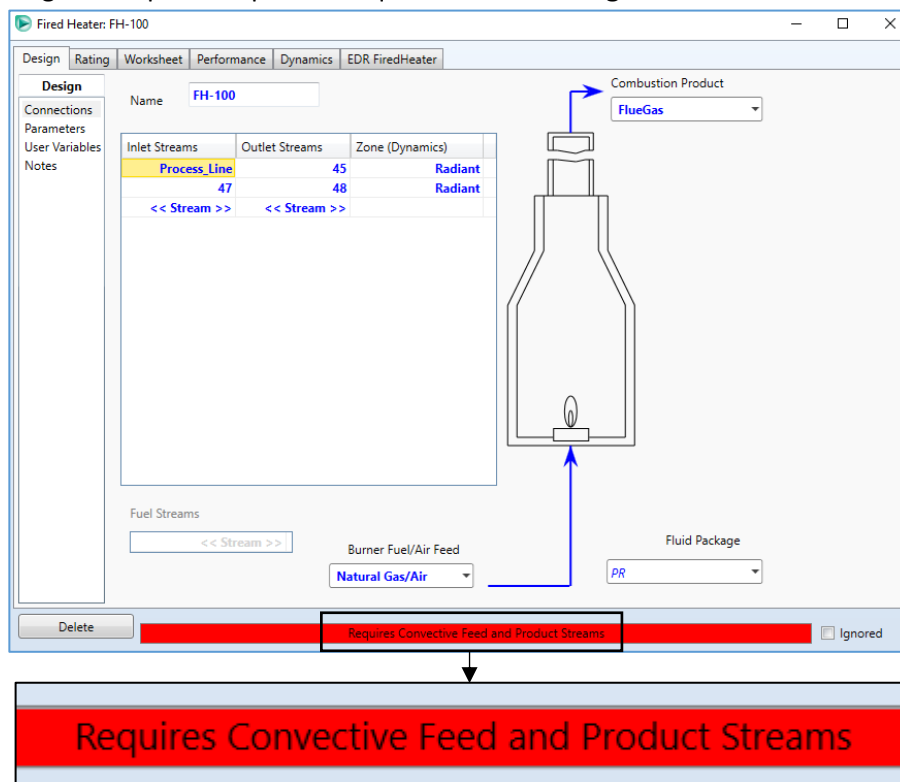


Figura 16: Configuració del mòdul *Fired Heater* utilitzat per a la simulació del sistema descrit

Com es pot observar, el programa indica que és necessari afegir un corrent a la zona convectiva, la qual no cal utilitzar en el sistema descrit en els apartats anteriors. És per aquest motiu que el mòdul integrat en el software per dur a terme aquesta simulació no és el més idoni per representar el comportament del sistema desitjat.

Per tant, per solucionar aquest problema cal buscar diferents alternatives i avaluar quina s'ajusta millor als objectius establerts anteriorment. La primera opció que cal estudiar és la possibilitat de programar un mòdul o modificar l'existent mitjançant programació. La segona opció és realitzar la simulació del forn mitjançant la combinació de diferents operacions unitàries ja existents en el programa utilitzat.

La primera alternativa queda ràpidament descartada com que, per a la simulació d'una OTS general com la d'aquest projecte, no cal un nivell de precisió a la simulació excessivament elevada, i realitzar o modificar aquest mòdul comprometria el temps dedicat a la resta del projecte. És per aquest motiu que es considera més oportú solucionar el problema mitjançant la segona opció. Per a fer-ho, es pren la decisió d'utilitzar un reactor de Gibbs per a fer reaccionar el combustible amb l'oxigen de l'aire i, a continuació, intercanviar energia entre els gasos de combustió i la línia de procés. El motiu pel qual es fa servir un reactor de Gibbs és perquè s'arriba a temperatures extremadament elevades i semblants a les de la flama que permeten simular de forma propera el que passaria en un forn de combustió. Tot i això, cal esmentar que el reactor de Gibbs és una eina teòrica que, a la realitat, no pot arribar a aquestes temperatures que són anormalment elevades (els fums surten a temperatures superiors als 1900 °C).

Cal aclarir que el que es vol simular és l'intercanvi de calor a la zona radiant, però amb aquest sistema alternatiu se simula convecció. Tot i això, l'elevada temperatura del fluid amb el que s'intercanviarà calor permet aproximar correctament el comportament del forn. Per altra banda, quan el forn s'apagués, la temperatura de la línia de procés hauria de disminuir ràpidament, cosa que la convecció podria dificultar. Tot i això, el reactor de Gibbs simula correctament aquest comportament, ja que quan el forn és apagat de cop, la temperatura de sortida d'aquest es redueix dràsticament.

Per tant, es procedeix a fer servir els mòduls esmentats per a realitzar la simulació del comportament del forn esmentat.

Amb l'objectiu d'organitzar aquestes operacions unitàries que simularan el comportament del forn, es decideix incorporar un *subflowsheet*. Aquesta operació es tracta d'un mòdul que permet incorporar-hi a dins les operacions unitàries que es desitgin simular, de forma que quan s'observa de forma global el model, aquesta part queda amagada en un volum de control. Aquest volum de control és el que representa el forn de combustió.

A continuació es mostra a la **Figura 17** l'esquema amb el *subflowsheet* representat.

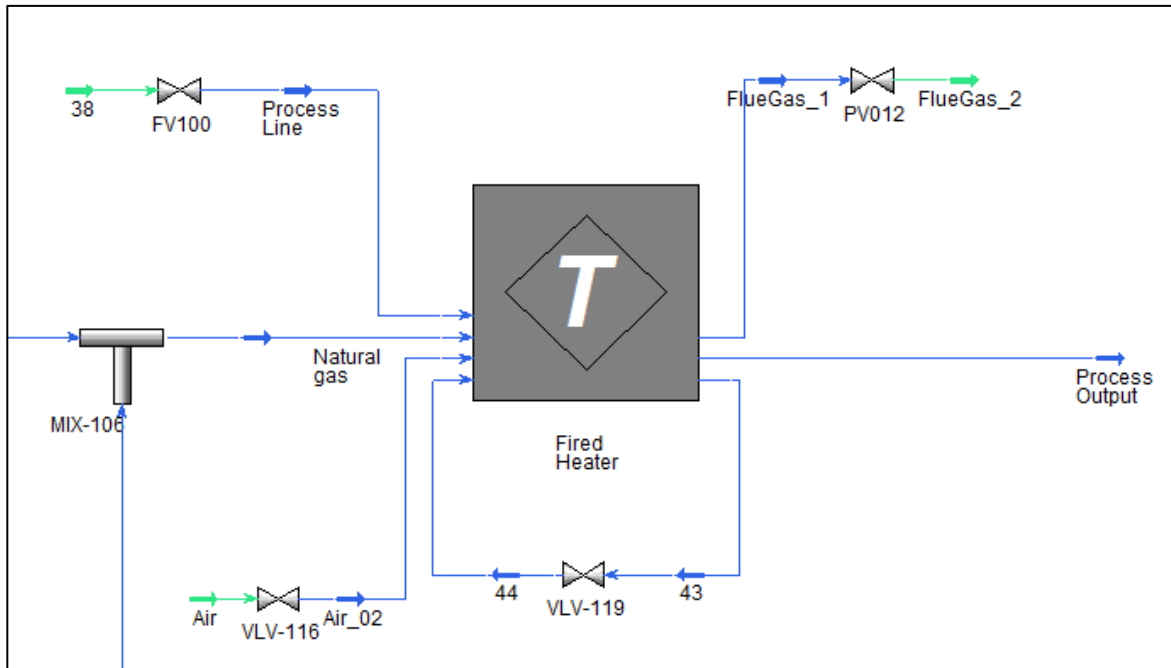


Figura 17: Secció del model simulat corresponent al forn de combustió

Com es pot observar, el mòdul gris (*subflowsheet*) representa el mòdul del forn. Per configurar aquest mòdul s'ha especificat quins corrents són entrades i quins són sortides. Es pot observar com entren les línies de gas natural, l'aire i la línia de procés. Aquestes línies donen lloc als gasos de combustió (*FlueGas*) i a la primera sortida de la línia de procés (Corrent 43) que, com es pot observar, torna a entrar al forn per a realitzar la segona passada (Corrent 44). A continuació, es procedeix a explicar els diferents mòduls per a la simulació del forn dins d'aquest *subflowsheet*.

5.3.5.1. Reactor de Gibbs

A partir dels corrents de combustible i d'aire, s'ajunten tots dos corrents en un de sol i es fan entrar dins del reactor de Gibbs, tal com es mostra a la **Figura 18**.

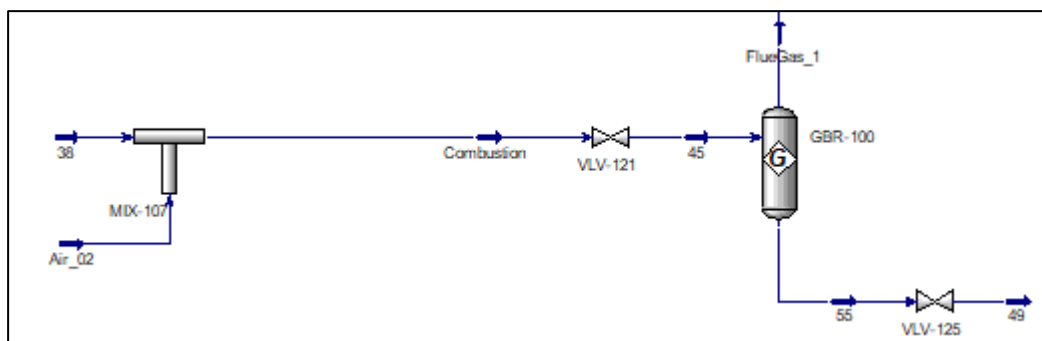


Figura 18: Secció del model corresponent al reactor de Gibbs

Per a configurar el reactor, primerament se seleccionen els corrents d'entrada i de sortida. Cal esmentar que, tot i ser una reacció en fase gasosa, el software necessita que se li configuri un corrent de sortida per al líquid, tot i que el cabal de líquid es mantindrà a zero durant tota la simulació. Per altra banda, s'indica que la reacció que succeirà serà una reacció de Gibbs, amb la qual cosa tampoc és necessari afegir la reacció que es durà a terme, ja que el mateix reactor buscarà la relació estequiomètrica. (9)

Finalment, per a la configuració és necessari indicar un volum per al reactor, el qual s'ha establert en 7 m³.

5.3.5.2. Intercanvi de calor

El corrent de sortida del reactor es troba a una elevada temperatura, absolutament fictícia, ja que és impossible que els fums de la combustió es trobin a tanta temperatura després de la reacció. Tot i això, aquesta temperatura irreal permet a continuació simular el comportament que tindria el forn a la zona radiant. Tot i això, no hem d'oblidar que el corrent de procés ha de passar dos cops a través del forn i, per tant, és necessari idear una solució per a poder portar a terme aquesta part de la simulació, ja que els intercanviadors de calor incorporats al software només permeten dues entrades i dues sortides.

La solució que es decideix implementar és fer servir dos bescanviadors de calor, un per a cada pas pel forn, de forma que es pot simular el comportament del forn desitjat. A la **Figura 19** es pot observar l'esquema realitzat.

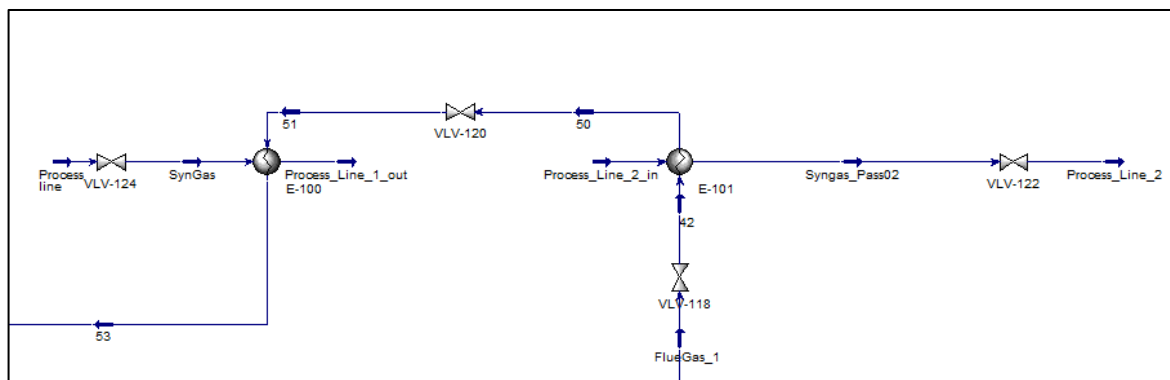


Figura 19: Configuració utilitzada per a simular les dues passades per el forn

Totes les vàlvules mostrades a la **Figura 19** corresponen a les caigudes de pressió de la línia. Tal i com s'ha realitzat en altres parts de la simulació, no s'ha afegit res més que el valor de C_v per simular aquesta caiguda, ignorant la resta de paràmetres com el volum de retenció o la posició de fallida.

Com es pot observar a la **Figura 19**, els gasos de combustió entren en primer lloc al bescanviador E-101 i la sortida d'aquest es connecta a l'entrada del bescanviador E-100. En canvi, el corrent de procés realitza un camí a contracorrent: Entra pel bescanviador E-100 i surt per l'E-101.

Per a una correcta configuració dels bescanviadors, es pren la decisió de fer servir bescanviadors detallats, els quals proporcionen un resultat més proper al comportament que succeeix en un sistema real. Una d'aquestes característiques que només es pot obtenir mitjançant aquest tipus de model és la inèrcia tèrmica, és a dir, la capacitat dels cossos de mantenir l'energia i la seva capacitat per a alliberar-la. Aquest factor proporciona a la simulació un factor temporal semblant al real.

Arribats a aquest punt, realitzar la simulació del forn es complica com que aquest forn no existeix. Tot i això, es pren la decisió d'establir 22 tubs per carcassa, amb dues passades, un diàmetre extern del tub de 114,3 mm i un diàmetre intern de 95,3 mm. Els tubs del bescanviador es col·loquen formant un triangle equilàter i amb una distància entre tubs de 142,9 mm. Aquesta distància es calcula tal com es mostra a la (Eq. 5.2) (11).

$$L_{\text{Pitch}} = 1,25 \cdot OD \quad (\text{Eq. 5.2})$$

On L_{pitch} és la distància entre el centre d'un tub i el següent i OD és el diàmetre exterior del cada tub.

A les Figures **Figura 20** i **Figura 21** es pot observar la introducció d'aquestes dades en el software utilitzat.

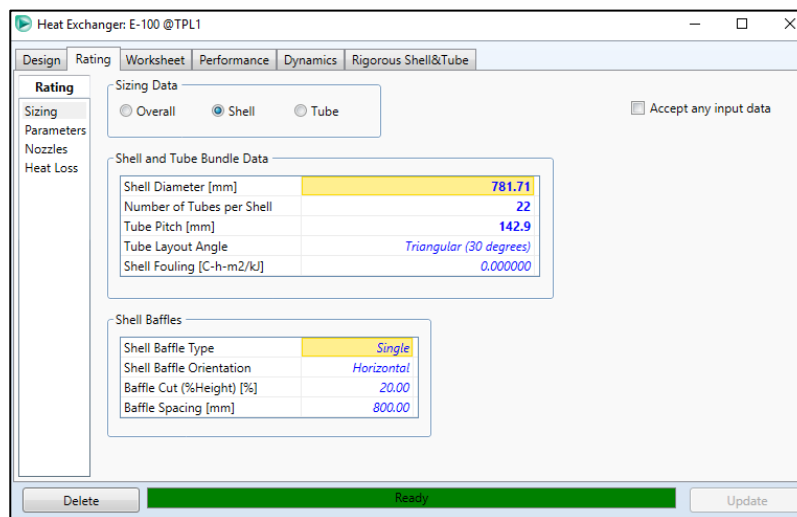


Figura 20: Configuració dels paràmetres corresponents a la carcassa dels bescanviadors

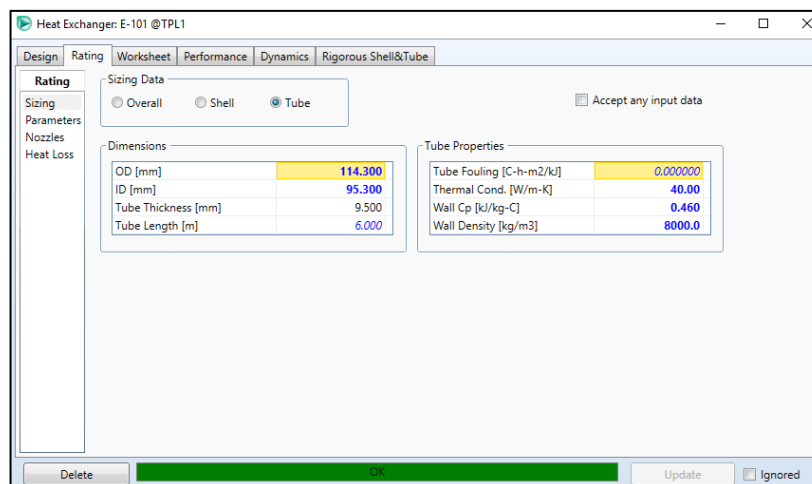


Figura 21: Configuració dels paràmetres corresponents als tubs dels bescanviadors

Per altra banda, el software ja incorpora el càlcul del diàmetre de la carcassa del bescanviador a partir de les dades de nombre de tubs i distància entre tubs. Els paràmetres esmentats són iguals per a tots dos bescanviadors. De forma contrària, la resta de paràmetres per a la correcta configuració han de canviar, ja que el comportament del forn a la primera passada i a la segona no és la mateixa.

Els paràmetres que s'han de configurar de forma específica són els coeficients d'intercanvi de calor, tant del procés com de les pèrdues d'energia. Degut a que aquests paràmetres no es coneixen, es procedeix a realitzar un mètode al tanteig per trobar els valors que fan que el sistema es comporti de la forma desitjada. Els valors que s'han acabat establir per aconseguir aquest comportament són els que es mostren a continuació (**Figura 22 i Figura 23**). (7)

Heat Transfer Coefficients	
Shell Heat Transfer Coeff. [kJ/h-m2-C]	100.0
Shell HT Coefficient Calculator	U specified
Tube Heat Transfer Coeff. [kJ/h-m2-C]	210.0
Tube HT Coefficient Calculator	U specified
Delta P	
Shell Delta P [kPa]	38.68
Shell Pressure Drop Calculator	user specified
Tube Delta P [kPa]	5.000e-003
Tube Pressure Drop Calculator	user specified

Heat Transfer Coefficients	
Shell Heat Transfer Coeff. [kJ/h-m2-C]	80.00
Shell HT Coefficient Calculator	U specified
Tube Heat Transfer Coeff. [kJ/h-m2-C]	160.0
Tube HT Coefficient Calculator	U specified
Delta P	
Shell Delta P [kPa]	38.68
Shell Pressure Drop Calculator	user specified
Tube Delta P [kPa]	5.000e-003
Tube Pressure Drop Calculator	user specified

Figura 22: Característiques de transferència d'energia i caiguda de pressió del bescanviador E-100 corresponent a la primera passada (esquerra) i E-101 corresponent a la segona passada (dreta)

Simple Heat Loss Parameters	
Overall U [kJ/h-m ² -C]	45.00
Ambient Temperature [C]	25.00
Overall Heat Transfer Area [m ²]	15.69
Heat Flow [kJ/h]	-133.7

Simple Heat Loss Parameters	
Overall U [kJ/h-m ² -C]	35.00
Ambient Temperature [C]	25.00
Overall Heat Transfer Area [m ²]	15.69
Heat Flow [kJ/h]	-229.9

Figura 23: Pèrdues de calor corresponent als bescanviadors E-100 (a dalt) i E-101 (a baix)

5.3.5.3. Parets del forn

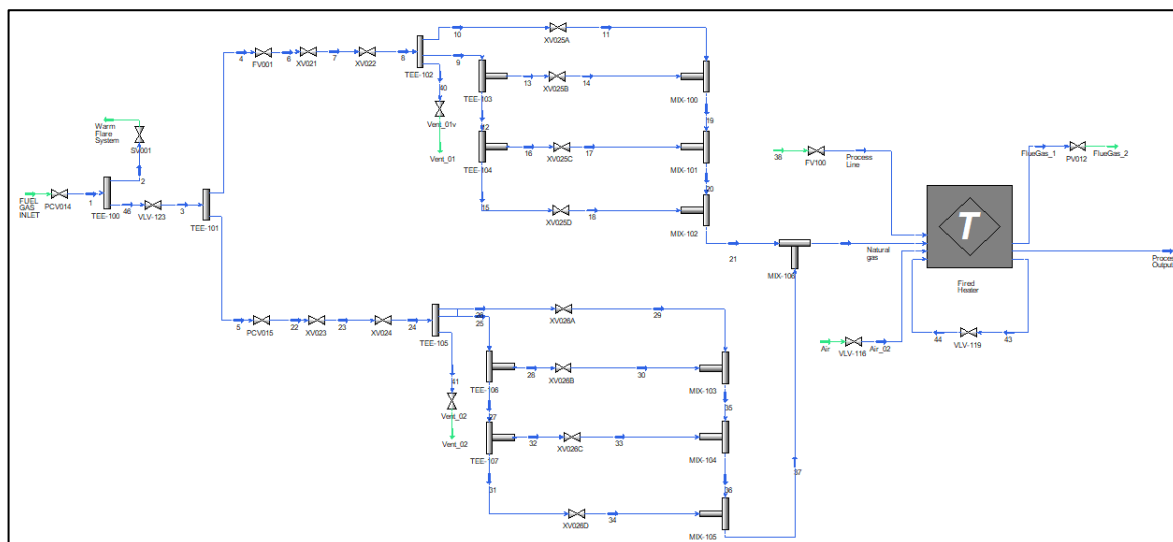
Un cop la transferència de calor s'ha modelitzat, és necessari introduir un factor que permeti simular la temperatura de les parets del forn. Aquestes temperatures són importants, ja que en aquest tipus de sistemes, les temperatures a les quals s'arriba són molt elevades i, per tant, el forn ha d'aturar el seu funcionament quan s'arriba a temperatures perilloses.

Les temperatures que s'han de controlar són la temperatura de la paret a la zona convectiva i de la xemeneia. Com que en cap d'aquestes zones s'intercanvia energia amb la línia de procés, no existeix una diferència elevada de temperatura entre la zona convectiva i la xemeneia.

Per a la simulació d'aquesta part del forn es fa ús del mòdul *Pipe*. Aquesta operació consisteix en la simulació d'una canonada, la qual permet introduir el material del qual està formada i les dimensions.

En el cas que ens ocupa en aquest projecte, es fan servir dos mòduls *Pipe* per a realitzar la simulació, un per a la simulació de la zona convectiva i un altre per a la xemeneia. A continuació es mostra la configuració escollida per als mòduls corresponents:

- **Zona convectiva:** Aquesta zona correspon a una zona ampla del forn a simular. Com que el sistema no existeix, no es disposen de mesures reals d'aquest. Tot i això, se sap que els forns que només fan servir zona radiant, corresponen a unitats de petites dimensions. Les dimensions escollides són de 5 metres de llarg i 3 metres de diàmetre.
- **Xemeneia:** La xemeneia és molt més prima que la de la resta del forn, ja que ha de permetre l'extracció dels fums cap a l'exterior. És per això que les dimensions que s'han utilitzat han estat de 5 metres de llarg i 1 metre de diàmetre.



5.4. Control del procés

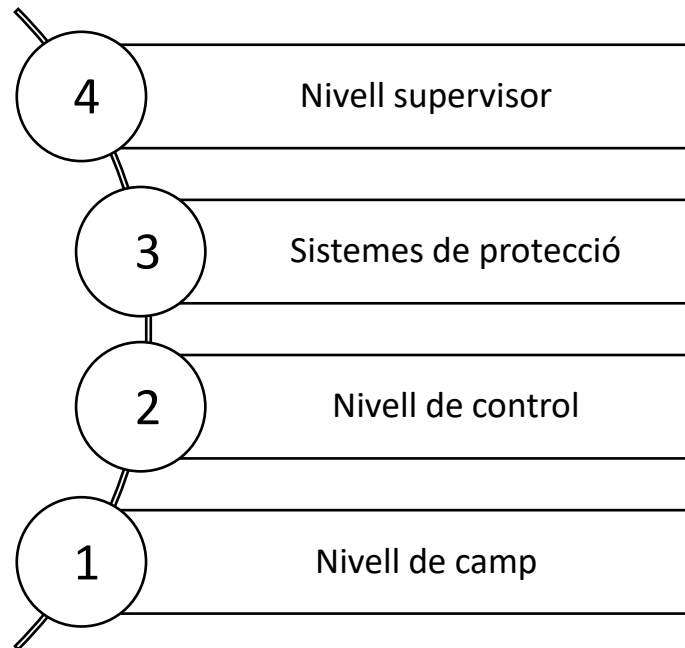


Figura 25: Esquema dels nivells de control d'un sistema

Un cop el procés es troba simulat en dinàmic i llaç obert, és necessari afegir sistemes de control en el procés. Existeixen diversos tipus de nivells de control.

El primer nivell que es mostra a la **Figura 25** és el nivell de camp. Aquest primer nivell és el més baix de la jerarquia d'automatització i consta de dispositius de camp, com sensors i actuadors. Tots aquests sensors són els que recopilen dades de pressió, temperatura, etc. La seva funció principal és la de transformar en senyals elèctriques aquests valors i transmetre'ls a nivells de control superior. Els actuadors també són inclosos en aquest nivell, tot i que el seu control depèn de nivells superiors. A la simulació, els sensors es simulen amb el mòdul de controlador (Controller), el qual en funció de la configuració posteriorment actuarà com a indicador o controlador.

El segon nivell utilitzat és el nivell de control, el qual consta de controladors que, mitjançant els senyals dels sensors, actuen sobre els actuadors per regular el funcionament de la planta. Els més utilitzats a les indústries reals són els controladors lògics programables. A la simulació, tal com s'ha comentat, aquesta funció està integrada juntament amb els sensors i indicadors.

El tercer nivell de control és el que s'encarrega de la protecció. Aquest nivell és la part més important del control d'una planta, ja que és l'encarregada d'aturar tot el sistema en cas d'existir qualsevol perill, tant per a la mateixa instal·lació com per als treballadors.

Per últim, el nivell supervisor és l'encarregat de la interacció home-Màquina (HMI), sistemes de control de supervisió i adquisició de dades (SCADA) per monitorar diversos paràmetres. Tota aquesta part del control és la que s'explica a l'apartat Interfície d'usuari.(12)

5.4.1. Nivell de camp

Per a la simulació d'aquest tipus de control cal diferenciar entre els sensors i els actuadors, els quals es troben incorporats a les vàlvules utilitzades. Per tant, en aquest apartat s'explica només la simulació dels diferents sensors que ha hagut d'afegir en el sistema.

Per a la simulació dels sensors es fa servir el mòdul de controladors. Aquests controladors posteriorment caldrà configurar-los perquè s'encarreguin de controlar el procés (**Nivell de control**). En aquest apartat només s'explicarà la configuració dels indicadors, els quals són els que s'encarreguen de llegir una variable i mostrar-la posteriorment. A l'apartat 5.4.2.1 es pot observar els diferents modes de control que es poden utilitzar.

En el sistema que ens ocupa, les variables que es controlen són temperatura (°C), pressió (kPa), cabal (STD m³/h) i paràmetres d'anàlisi.

Per a configurar aquests instruments, és necessari indicar el rang en el qual estan preparats per operar així com la variable que cal indicar. Normalment, els valors utilitzats com a rang són proporcionats pel fabricant de la sonda, però com que en aquesta situació el client no proporciona aquestes dades, no es disposa d'aquesta informació. Tot i això, el més comú és que els sensors utilitzats puguin fer una lectura dins el rang esperat per aquesta variable. És per això que en aquesta situació, s'ha decidit estimar aquests paràmetres límit per al sistema en qüestió.

A continuació s'explica les parts del sistema on cal afegir els diferents sensors que actuaran com indicadors o controladors posteriorment. Cal esmentar que la posició de controladors, indicadors i vàlvules és informació proporcionada per l'empresa Inprocess.

Taula 13: Noms dels mòduls que serviran per simular els sensors de la planta

Secció de la simulació	Control	Nom de l'indicador
Línia de gas	Temperatura	TI014
	Flux	FI014
	Pressió	PIC014
Línia de cremadors	Pressió	PI005
	Flux	FIC001
Línia de pilots	Pressió	PI010
	Pressió	PIC015
Entrada del corrent de procés	Temperatura	TI100
	Pressió	PI100
	Flux	FIC100
Sortida del primer pas	Temperatura	TI001
Sortida del segon pas	Pressió	PI002
	Temperatura	TIC090
Paret zona convectiva del forn	Temperatura	TI003
Paret xemeneia	Temperatura	TI004
Diferència de pressió al forn	Pressió	PI011
Gasos de combustió	Pressió	PIC012
	Excés d'O ₂	AI001
	Metà sense reaccionar	AI003
Flama	Temperatura	TI150
Aire	Cabal	FI150
Forn	Calor intercanviat	DUTY

- Línia de gas: El més usual en els sistemes és conèixer en tot moment les condicions d'entrada i sortida de les diferents corrents de procés del sistema i més en una línia de combustible com la que intervé en el sistema estudiat. En aquest cas, és necessari afegir tres indicadors: temperatura (TI014), pressió (PI014) i cabal (FI014). A més a més, és important especificar que les variables es mesuren just després de la vàlvula de control de pressió, ja que d'aquesta forma es pot controlar l'apertura de la vàlvula posteriorment. Els indicadors esmentats es poden observar a la **Figura 26**.

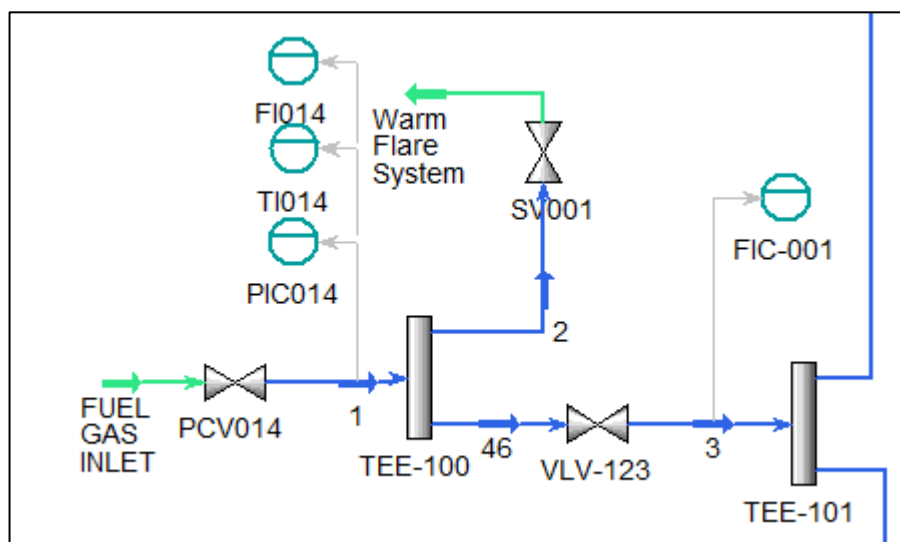


Figura 26: Indicadors i controladors utilitzats en el sistema a la entrada de combustible

Tot i això, és necessari controlar la quantitat de combustible que entra en el forn. Per aquest motiu, existeix un sensor just abans de la bifurcació de les dues línies que s'encarrega de mesurar, de nou, el cabal que entra en el sistema (just després de la vàlvula de seguretat SV001). Posteriorment s'explicarà que aquest controlador actuarà directament sobre la vàlvula de control de flux dels cremadors.

- Línia de cremadors: Una quantitat inadequada de combustible pot originar un nivell de pressió molt baix o molt elevat que pot posar en risc el correcte funcionament d'aquests cremadors. Per aquest motiu, cal controlar mitjançant un indicador la pressió de la línia (PI005), per tal de vigilar que els valors que pren aquesta variable es mantingui dins del rang que assegura un correcte funcionament.
- Línia de pilots: Igual que a l'apartat anterior, és necessari controlar que la pressió (PI010) també es trobi dins del rang, amb el mateix objectiu de protegir la instal·lació i la seguretat. Tot i això, la línia té un altre sensor de pressió just abans de les vàlvules de pas de combustible, el qual s'encarregarà de controlar que la pressió es mantingui constant a la línia. A continuació, a la **Figura 27** es poden observar la posició d'aquests sensors.

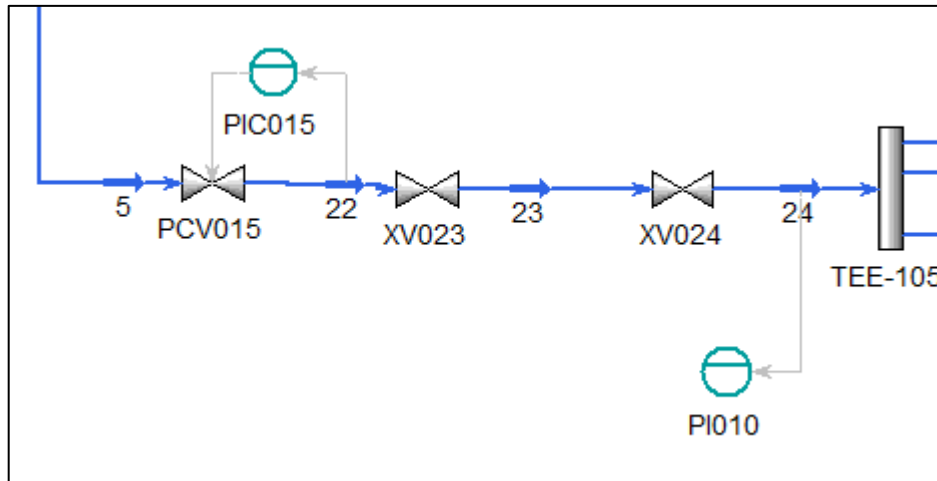


Figura 27: Indicadors i alarmes de pressió a les línies de cremadors i pilots

- Entrada del compost de procés: Tal com s'ha realitzat amb la línia de combustible, és important conèixer les condicions en les quals entra un corrent en el sistema. És per aquest motiu que aquesta línia també farà ús de sensors de temperatura, cabal i pressió.

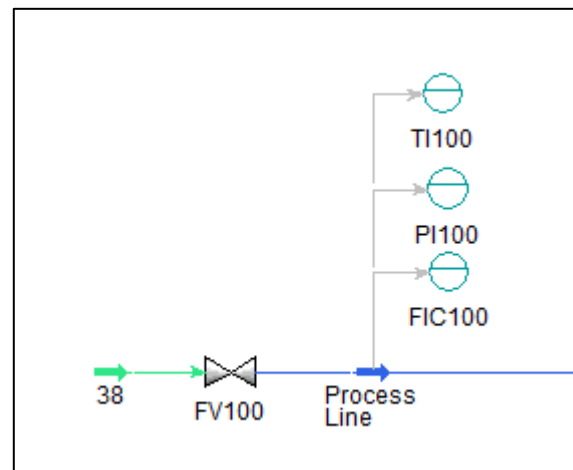


Figura 28: Sensors utilitzats per a controlar l'estat inicial del cabal de procés

- Sortida del compost de procés: L'objectiu d'aquest forn és escalfar la línia de procés i, per tant, és necessari conèixer les temperatures de sortida d'aquesta línia. Per això és imprescindible fer ús de sensors de temperatura a cada una de les passades que realitza la línia. Per altra banda, existeix una caiguda de pressió pel fet de circular a través del forn i, per aquest motiu, una altra variable d'interès és la pressió de sortida final de la línia.

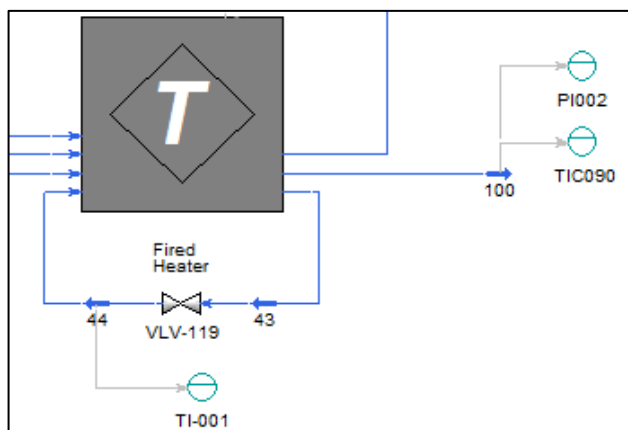


Figura 29: Sensors utilitzats a les sortides de la línia de procés

- Temperatures de paret: El forn és una operació unitària amb variables importants que cal controlar de forma acurada, ja que les temperatures de treball són molt elevades i es treballa amb quantitats grans de combustible que poden posar en perill la seguretat de la instal·lació. Variables com la temperatura de la paret a la zona convectiva o a la sortida de fums, les quals no es troben preparades per a treballar a temperatures tan elevades com a la zona radiant, fan necessari la instal·lació de sondes de temperatura que indiquin els valors d'aquestes variables (TI003 i TI004 respectivament). Tal com es va explicar a l'apartat **5.3.5.3 Parets del forn**, es va fer ús de mòduls PIPE per a la simulació de les parets ja que incorporen un càlcul de pèrdues energètiques prou sofisticat com per a mostrar la temperatura de les parets. Aquestes temperatures són les que es mostraran amb aquests indicadors.
- Diferència de pressió al forn: Cal mesurar també la diferència de pressió entre l'exterior i l'interior del forn, ja que una diferència de pressió molt elevada pot implicar que l'aire no entri al forn de forma correcta.
Per calcular aquesta diferència es realitza la diferència entre la pressió a la sortida i la pressió a la sortida mitjançant un spreadsheet. Aquesta eina incorporada al software és un full de càlcul que permet importar i exportar diferents variables a altres parts de model. En aquest cas, cal exportar el valor d'aquesta variable cap a l'indicador corresponent. Com que la caiguda de pressió dels fums al forn no adquireix valors de l'ordre de bars, es pren la decisió d'indicar aquest paràmetre mitjançant unes altres unitats, com són els mmH₂O. Aquestes unitats permeten visualitzar els canvis de pressió d'un ordre de magnitud inferior, permetent una millor lectura per a l'usuari que l'ha d'interpretar.
- Gasos de combustió: Els gasos de combustió és necessari analitzar-los amb l'objectiu de conèixer la qualitat de la reacció a l'interior del forn. Una de les variables que és necessari indicar és la quantitat de gas natural que pugui quedar en el forn, per tal d'evitar una acumulació de gas que posi en perill la seguretat de tota la instal·lació. Tot i ser una variable d'especial importància, el software no incorpora aquesta variable de forma directa i és

necessari realitzar una sèrie de càlculs que permetin representar aquest nivell de perillositat. Això es representa amb el límit inferior d'inflamabilitat (LEL). Aquest paràmetre representa el percentatge en volum de combustible mínim a l'ambient a partir del qual una guspira podria fer que la barreja explotés. Aquest valor és diferent per a cada compost inflamable. En el cas que s'estudia en aquest projecte, el combustible és gas natural, el qual està format per diversos compostos amb límits inferiors d'inflamabilitat diferents. Tot i això, el compost majoritari és el metà (96 %vol) i es pren la decisió de mesurar i mostrar el límit d'inflamabilitat en funció d'aquest compost, el qual té un LEL d'un 5 %vol. (13)

El nivell de perillositat es mostra en unitats de %LEL. Aquestes unitats permeten saber com de prop del valor límit es troba la concentració de metà al forn, és a dir, un 100 %LEL representa que existeix un 5 %vol de metà dins el forn, el valor a partir del qual existeix risc d'explosió.

Per a calcular aquest valor, es fa ús d'un Spreadsheet. En aquest cas, l'única variable que cal importar al full de càlcul és la fracció de metà a la sortida del reactor de Gibbs, la qual representa tot el metà que no ha reaccionat i que podria acumular-se a la cambra del forn. Aquesta fracció es multiplica per 100 amb l'objectiu d'igualar les dues unitats i finalment es realitza l'operació mostrada a (Eq. 5.3).

$$\%LEL = \frac{\%CH_4}{LEL\ CH_4} \cdot 100 = \frac{\%CH_4}{5\%} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.3})$$

A la **Figura 30** es pot observar el resultat d'aquest Spreadsheet. El valor resultant d'aquesta operació és el que cal mostrar a l'usuari mitjançant un indicador (AI003). Els indicadors permeten monitoritzar variables calculades com la mostrada a la equació (Eq. 5.3), ja que es contempla la possibilitat de que sigui necessari la simulació d'una variable no incorporada directament en el software.

	A	B	C	D
1		LEL, %	xCH4	CH4 %vol
2	Methane	5.000	0.0000	0.0000
3				
4	PV_AI003	1.851e-017		

Figura 30: Càlculs del %LEL en un *Spreadsheet* (full de càlcul)

Una altra variable necessària per conèixer la combustió és la quantitat d'oxigen en excés. Aquesta variable pot aportar una gran informació de si la combustió s'està portant a terme de forma completa o si no ho està fent, per tal que posteriorment es puguin realitzar les accions pertinents.

Aquest indicador (AI001) només comprova la quantitat d'oxigen en els gasos de combustió i el mostra en percentatge.

- Cabal d'aire: Una altra variable que cal afegir a la simulació és el cabal d'aire que circula. Aquesta variable no sempre és incorporada a les plantes amb forns de convecció natural, però en aquest cas, com que la simulació té com a objectiu l'aprenentatge dels operadors, és una variable necessària perquè compreguin els moviments d'aire i la seva alta dependència amb la temperatura. L'indicador que s'encarrega de mesurar aquesta variable és l'anomenat FI150.
- Temperatura de flama: És necessari afegir un sensor que permeti visualitzar la temperatura de la flama. Com que, en primer lloc la simulació no té flama i a més a més el software no permet la visualització d'aquesta variable, es decideix realitzar una aproximació que permeti mostrar-la. Per fer-ho, mitjançant un Spreadsheet es comprova quin és l'estat del forn. Si no hi ha com a mínim un pilot i un cremador encesos alhora, el forn es considera que no té flama. De forma contrària, si aquestes condicions es compleixen, el forn té flama. En funció d'aquesta variable, el sensor haurà d'indicar una temperatura o una altra. Si el forn està sense flama, la temperatura que es decideix llegir és la dels fums que hi circulen. De forma contrària, si el forn té flama cal mostrar aquest valor. La temperatura de flama del metà és de 1960 °C. Si s'observa la temperatura de sortida del rector de Gibbs amb una quantitat d'aire estequiomètrica, es llegeix aquest mateix valor. Per tant, es decideix utilitzar aquesta temperatura de sortida del reactor com la de la flama. Tot i això, per evitar un canvi de temperatura massa directe en aquest sensor quan la flama s'apaga, s'aplica un retard al senyal que permeti una graduació en el canvi. Aquest canvi s'aconsegueix amb el mòdul *Transfer function block*. El que es realitza és la importació del valor de temperatura i s'aplica un *Lag* de 6 segons per mantenir aquesta tendència ràpida, però sense ser instantània.
- Calor bescanviada: Una de les variables que es pot mesurar és la calor bescanviada dins del forn. Normalment, aquesta variable no es mesura, ja que les diferents temperatures del procés permeten conèixer aquesta característica. Tot i això, la finalitat educadora d'aquest projecte necessita mostrar aquesta variable. Per tant, obeint els requeriments dels clients, s'afegeix en el sistema.
La calor bescanviada a la simulació és la suma de les calors bescanviades als dos bescanviadors utilitzats. Aquestes quantitats d'energia se sumen en un Spreadsheet i es mesura amb un indicador.
- Sensors de flama: Una altra part d'especial importància en el forn són els detectors de flama. Aquests aparells s'encarreguen d'identificar la presència de flama tant en els cremadors com en els pilots. En el model, aquesta funció passa a ser una feina complicada de simular. En primer lloc, els pilots i cremadors estan simulats com a vàlvules que permeten el pas de combustible cap al reactor, on se simula la combustió. En segon lloc, no existeix un detector de flama en el software utilitzat. Per aquest motiu, a la simulació es considera que existeix

flama sempre que la posició de les vàlvules de pilots i/o cremadors sigui totalment oberta (és a dir, indicadors ZSHxxx en 1) i existeixi flux de combustible a través de la mateixa vàlvula.

Per a poder simular-ho, cal fer servir un Spreadsheet on s'importen les diferents variables abans mencionades. Aquests detectors s'identifiquen amb un BS001A/B/C/D per als detectors als cremadors i amb un BS002A/B/C/D per als dels pilots. A continuació es mostra la part de l'Spreadsheet que simula aquesta funció (**Figura 31**).

	A	B	C	D	E	F
1	BS0502A	1 - On	1.000	PILOT #A FLAME DETECTION	1.156 kg/h	
2	BS0502B	1 - On	1.000	PILOT #B FLAME DETECTION	1.156 kg/h	
3	BS0502C	1 - On	1.000	PILOT #C FLAME DETECTION	1.156 kg/h	
4	BS0502D	1 - On	1.000	PILOT #D FLAME DETECTION	1.156 kg/h	
5		Nº PILOTS	4.000			
6	BS0501A	1 - On	1.000	BURNER #A FLAME DETECTION	98.24 kg/h	
7	BS0501B	1 - On	1.000	BURNER #B FLAME DETECTION	98.24 kg/h	
8	BS0501C	1 - On	1.000	BURNER #C FLAME DETECTION	98.24 kg/h	
9	BS0501D	1 - On	1.000	BURNER #D FLAME DETECTION	98.24 kg/h	
10		Nº BURNERS	4.000			

Figura 31: Simulació dels detectors de flama al model en AspenHysys

$$= @IF(B1 > 0 \text{ AND } E1 > 1e - 4, 1, 0) \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Com es pot observar, la columna C correspon al valor d'aquest detector de flama. El seu valor es calcula a partir de l'equació (Eq. 5.4). Quan el valor de la columna B (ZSHxxx) es troba en 1 i alhora, circula combustible a través del cremador o pilot (és a dir, que el valor de la columna E és major a una tolerància), el seu valor pren 1 (flama encesa).

Per altra banda, es pot observar com a les caselles C5 i C10 s'indica el nombre de pilots i cremadors que es troben en funcionament.

- Indicadors de flama: A l'apartat anterior s'ha explicat el funcionament del detector de flama. Tot i això, aquest detector és necessari que envii el senyal a un llum a la pantalla. Aquest llum no s'encén de forma immediata en el sistema, sinó que té un retard de 15 segons. Per simular aquest retard, es fa servir un bloc amb una funció de transferència (*Delay*) i que envia posteriorment el senyal a controls superiors.

5.4.2. Nivell de control

5.4.2.1. Controladors

Taula 14: Resum dels controladors afegits a la simulació i les seves constants

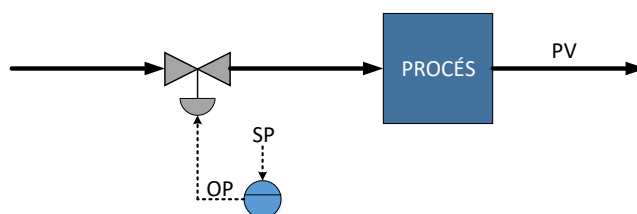
Nom	Tipus de control	K_P	T_i (minuts)
PIC014	Invers	17	1,77
PIC015	Invers	5	1
FIC001	Invers	0,2	0,1
TIC090	Invers	4,5	10
PIC012	Invers	2	1
FIC100	Invers	0,459	0,0147
Air Controller	Invers	0,1	0,133

Tal com s'ha comentat anteriorment, indicadors i controladors fan servir el mateix mòdul. A l'apartat anterior s'ha explicat quines eren les zones on calia tenir un control de variables (sensors) i en aquest apartat s'acabarà de configurar els diferents mòduls utilitzats perquè actuïn com a controladors en cas que sigui necessari. Els diferents modes de treball del mòdul són: Indicador, Manual, Automàtic i cascada. Aquests tres darrers modes corresponen tots ells als que realitza un controlador, però cadascú compleix una funció específica. A la **Taula 15** es mostra una descripció de cadascun dels modes descrits.

Taula 15: Descripció dels diferents modes de treball del mòdul *Controller* a AspenHysys (9)

Mode	Descripció
Indicador	Es tracta del mode que permet mostrar el valor d'una variable, però sense possibilitat d'actuar per tractar de canviar-lo.
Manual	Aquest mode controla el valor d'una variable i mitjançant una vàlvula, permet decidir de forma manual la seva apertura.
Automàtic	Es tracta d'un mode que permet de forma automàtica controlar el valor d'una variable. Per fer-ho, necessita els paràmetres corresponents a un PID per a decidir l'apertura de la vàlvula que permet aconseguir de forma estable el valor desitjat (consigna).
Cascada	De vegades, un controlador no actua directament sobre una vàlvula, sinó que actua sobre un altre controlador. Aquest mode de treball es diu en cascada. El controlador que controla la variable s'anomena controlador mestre, ja que és ell el que s'encarrega de decidir què ha de fer el segon controlador, el qual s'anomena esclau. Aquest últim té la funció de rebre el valor desitjat de consigna i calcular l'apertura de la vàlvula necessària per aconseguir el valor desitjat.

Els controladors poden treballar en llaç obert o en llaç tancat. En el cas de llaç obert, l'esquema que el representa és el que es mostra a continuació (**Figura 32**).

**Figura 32:** Representació d'un sistema controlat amb llaç obert

Com es pot observar, el controlador mostrat a la figura (●) és el que s'encarrega d'obrir la vàlvula (OP) per aconseguir el valor de consigna (SP) desitjat. La sortida del procés, tot i això, no és rebuda per el controlador i, per tant, el controlador no pot ajustar el valor de la senyal OP per assegurar que la sortida és el valor desitjat.

Per aconseguir aquesta forma d'actuar, els controladors poden treballar en llaç tancat. L'esquema que representa aquest mode de treball és el que es mostra a continuació (**Figura 33**).

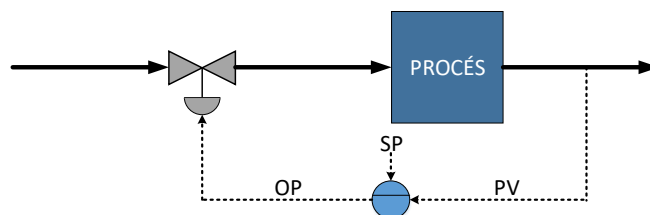


Figura 33: Representació d'un sistema controlat amb llaç tancat

Com es pot observar, en un sistema en llaç tancat el controlador mesura la variable controlada (PV) i en funció de la diferència amb el valor de consigna (SP), corregeix el valor d'apertura necessària a la vàlvula (OP).

$$\varepsilon = PV - SP \quad (\text{Eq. 5.5})$$

La variable ε és el que s'anomena error i es defineix, tal com es mostra a (Eq. 5.5), com la diferència entre el valor de la variable de procés i el valor de consigna. A partir d'aquest valor, el controlador calcula la OP necessària per aconseguir el valor desitjat en el sistema.

Tot i això, cal especificar també al controlador com ha d'actuar en funció del signe de ε , és a dir, en funció de si el valor de la variable de procés (PV) es troba per sobre del valor de consigna o per sota.

Si el controlador ha de tancar la vàlvula davant d'un valor negatiu de ε (és a dir, davant d'una $\varepsilon < 0$, el controlador ha d'aplicar una $\Delta OP < 0$). En aquesta situació, es diu que el controlador es troba en Directe.

De forma contrària, si davant d'una $\varepsilon < 0$ el controlador ha d'augmentar el senyal OP ($\Delta OP > 0$) el controlador es troba en Invers.

Un exemple d'aquests dos modes de funcionament són a les figures mostrades a continuació. El sistema que es representa a l'esquerra de la **Figura 34** és un tanc on s'ha de controlar el nivell de líquid (PV). El controlador està col·locat de forma que ha de regular la entrada al tanc. Si el nivell del tanc és superior al desitjat ($\varepsilon > 0$), el controlador haurà de tancar l'accés de fluid a l'interior ($\Delta OP < 0$). Això vol dir que el controlador es troba en mode Invers.

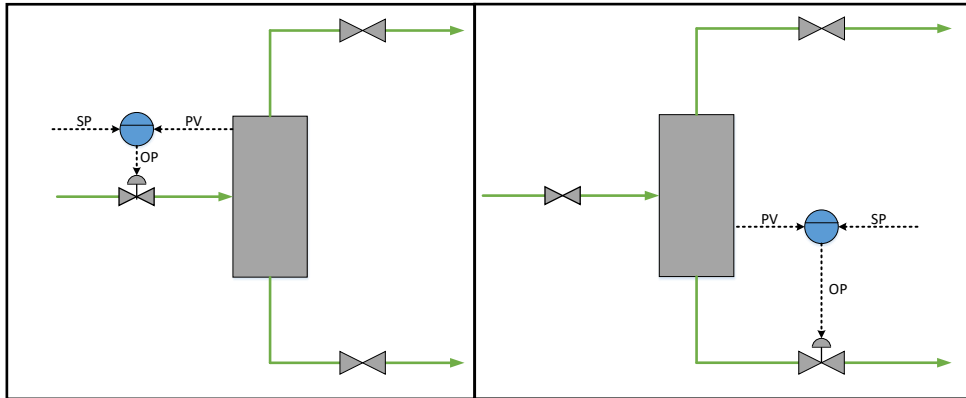


Figura 34: Exemple d'un controlador en mode Invers (esquerra) i en mode directe (dreta)

De forma contrària, el sistema representat a la dreta de la **Figura 34** ha d'actuar diferent. En cas de que el valor del nivell sigui superior al desitjat ($\varepsilon > 0$), com el controlador es troba regulant la sortida de líquid, haurà d'obrir aquesta vàlvula per permetre evacuar l'excés de fluid al sistema $\Delta OP > 0$. Aquest controlador es troba en mode Directe.

Per altra banda, els controladors que es fan servir a la simulació són controladors PID. Aquests es caracteritzen per oferir un control mitjançant tres paràmetres a ajustar: El proporcional, l'integral i el derivatiu.

- Controlador Proporcional (P)

El primer d'aquests paràmetres és el paràmetre K_p , el qual correspon al guany del controlador. Aquest és el paràmetre més simple de tots tres i permet evitar les oscil·lacions del sistema en llaç tancat, tot i que no pot assegurar que el valor es mantingui al valor de consigna (Veure **Figura 35**). La sortida del controlador és la que es mostra a l'equació (Eq. 5.6).

$$OP(t) = K \cdot \varepsilon(t) + b \quad (\text{Eq. 5.6})$$

En aquest cas el paràmetre b correspon al valor de biaix que apareix quan l'error és zero.

- Controlador Proporcional i Integral (PI)

Per assegurar que el valor de la variable de procés arribi al desitjat, és necessari afegir un paràmetre integral al controlador (T_i). Aquest s'encarrega d'assegurar que el valor arribarà al valor de consigna, tot i que si la seva acció és molt elevada, pot acabar fent oscil·lar el sistema. Aquest tipus de controladors són els més comuns a la indústria, també en el cas que ens ocupa en aquest projecte. A l'equació (Eq. 5.7) es mostra la sortida d'un controlador amb paràmetre proporcional (K_p) i paràmetre integral (T_i).

$$OP(t) = K \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon(t) dt \right) \quad (\text{Eq. 5.7})$$

Com es pot observar, en aquesta situació el paràmetre constant del biaix present al controlador proporcional queda substituït pel control integral, la qual cosa vol dir que aquest darrer control proporciona un biaix ajustat automàticament per eliminar l'error. Cal destacar també que en el cas de l'acció integral, com més petit és el paràmetre T_i , més elevat és el seu efecte. L'efecte d'aquesta integració proporciona una acció més lenta que la del control proporcional, però permet arribar al valor de consigna, tal com es pot observar a la **Figura 35**.

- Control proporcional integral i derivatiu (PID)

El control derivatiu té com a objectiu anticipar-se al sistema observant com és el canvi en el valor d'error. El senyal de sortida d'un controlador PID és la que es mostra a continuació (equació (Eq. 5.8)).

$$OP(t) = K \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon(t) dt + T_d \left(\frac{d(\varepsilon(t))}{dt} \right) \right) \quad (\text{Eq. 5.8})$$

La resposta obtinguda en aquest cas és similar a la que s'obtingria en un controlador amb acció proporcional, però sense el valor d'offset, ja que l'acció integral s'encarrega de corregir-lo. Tot i això, l'acció derivativa genera canvis en el sistema que poden originar soroll (Veure **Figura 35**) i, per tant, el seu ús no és tan comú. (9)

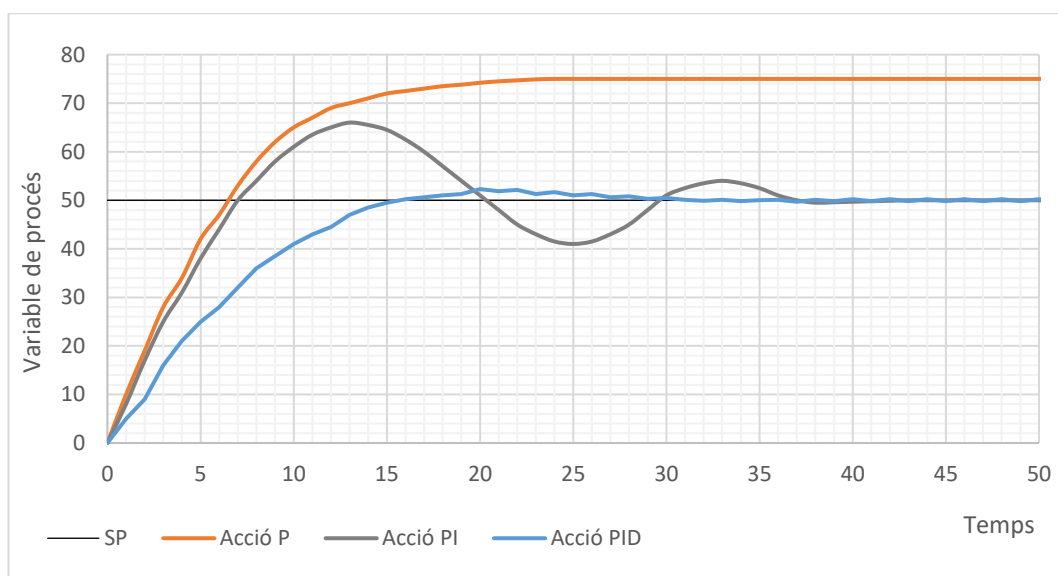


Figura 35: Comparació dels controladors amb acció proporcional; proporcional i integral i proporcional, integral i derivativa

Per al procés que cal controlar en aquest projecte, es farà ús de controladors PI. Això és degut al fet que una acció només proporcional no pot garantir que s'assoleixi el valor de consigna. Per altra banda, l'acció derivativa no s'afegeix en el controlador perquè en un sistema com el forn, és millor treballar amb senyals estables i sense soroll.

Per a determinar aquests paràmetres, el software utilitzat incorpora l'eina *Autotunner* que calcula els valors de les constants mencionades. Tot i que el programa és capaç de calcular-les, cal vigilar que el control de la variable sigui estable i, per tant, aquesta eina s'utilitza amb la intenció d'aconseguir una aproximació. A partir dels resultats que aportí el càlcul del software, es modifiquen els paràmetres per aconseguir una resposta amb la velocitat desitjada i estable.

Els controladors que cal introduir en el sistema simulat actuaran sobre aquelles vàlvules que s'han introduït en el sistema a l'apartat 5.2. A continuació s'explica cadascun d'aquests controladors:

- **PIC014:** Aquest controlador és l'encarregat de controlar la vàlvula PCV014. La seva funció és mantenir una pressió a la línia principal de gas de 1471 kPa, de forma que a mesura que els cremadors i pilots s'encenen, aquesta vàlvula detecti que la pressió de la línia disminueix i obri la vàlvula de pas al combustible. Les vàlvules anomenades PCV són autoregulables, però com que el software no incorpora aquest tipus de vàlvula, és necessari afegir un controlador que realment està integrat en els sistemes reals.

El tipus de controlador ha de ser invers, ja que en el cas que la pressió augmenti per sobre del SP, la vàlvula ha de tancar-se.

Els paràmetres de control proporcional i integral s'han obtingut en primer lloc mitjançant l'eina *Autotunner*. Els resultats obtinguts durant un augment i durant una disminució del SP han estat els mostrats a la **Figura 36**.

Com es pot observar, el resultat amb els paràmetres calculats és estable i sense oscil·lacions, amb la qual cosa es decideix donar-los com a vàlids.

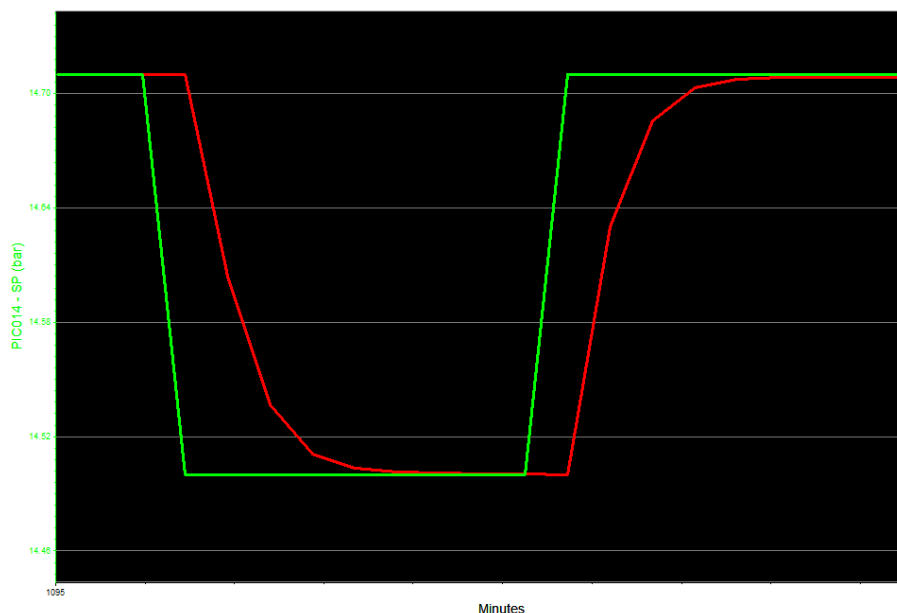


Figura 36: Resposta del controlador PIC014 on la senyal vermella representa el SP i la verda la PV

- **PIC015:** Aquest controlador de pressió és el que s'encarrega de regular la pressió de la línia de pilots mitjançant la vàlvula PCV015. En aquesta situació, el valor de pressió desitjat a mantenir a la línia és de 101,5 kPa. Mitjançant aquest control, la vàlvula permet que flueixi cap als pilots la quantitat necessària de combustible. A l'igual que ha succeït amb el controlador anterior, aquesta vàlvula es configura en mode Invers.

Finalment, els paràmetres K_p i T_i trobats pel programa no han proporcionat una resposta prou bona al canvi de pressió quan el valor de consigna passa a ser inferior. Tal i com es mostra a la **Figura 37**, la resposta del controlador es massa ràpida, sobrepasant inicialment el valor de consigna. Per aquest motiu s'ha decidit modificar manualment els paràmetres per aconseguir la resposta desitjada (**Figura 38**).

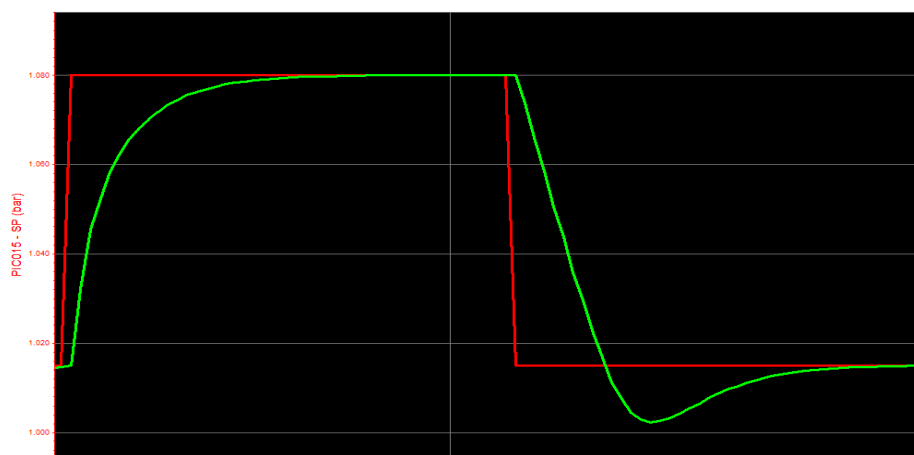


Figura 37: Resposta de la pressió del controlador PIC015 amb els valors K_p i T_i calculats pel software

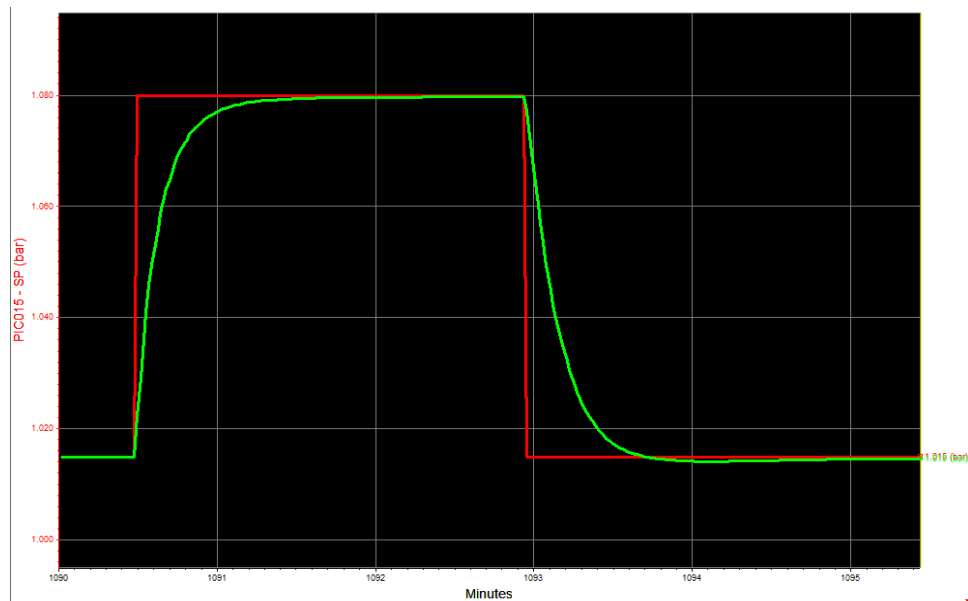


Figura 38: Resposta de la pressió del controlador PIC015 amb els valors K_p i T_i modificats

Tal com es pot observar, un cop el paràmetre proporcional (K_p) ha estat disminuït i el paràmetre integral (T_i) augmentat (és a dir, s'han reduït totes dues accions), la velocitat del controlador s'ha vist disminuïda, però alhora s'ha aconseguit que la PV no sobrepassi el SP d'una forma tan acusada. Com que existeixen alarmes en aquesta part del sistema per evitar valors anormals de pressió, és important assegurar que un sobrepuig en la variable no aturi el forn i, per tant, és millor obtenir una resposta més lenta.

- **FIC001 i TIC090:** Aquests controladors és necessari configurar-los alhora, ja que es tracta d'un sistema de control en cascada. En primer lloc cal configurar el controlador FIC001, és a dir, el controlador esclau. Aquest controlador és l'encarregat de regular el cabal de combustible que es dirigeix cap als cremadors. La seva acció és inversa, ja que en el cas que el valor del cabal que circula sigui superior al desitjat ($\varepsilon > 0$), és necessari que la vàlvula es tanqui ($\Delta OP < 0$). En el cas del controlador TIC090, el comportament és el mateix, ja que quan la temperatura és massa elevada, cal disminuir el senyal OP.

Per a configurar els paràmetres K_p i T_i s'ha de partir del controlador esclau. Per fer-ho cal ajustar-lo com si no ho fos, és a dir, en el mode automàtic. A continuació, cal col·locar-lo en mode cascada. En aquest moment, cal configurar el controlador mestre (TIC090). Si es realitza aquesta operació i es comprova l'estabilitat, s'observa com l'alarma de pressió de la línia de cremadors s'activa, la qual cosa indica que el sistema és massa ràpid. Per tant, la solució exigeix configurar manualment ambdós controladors per acabar obtenint una resposta lenta, però segura.

El resultat de realitzar aquest ajust manual és mostrat a la **Figura 39**.

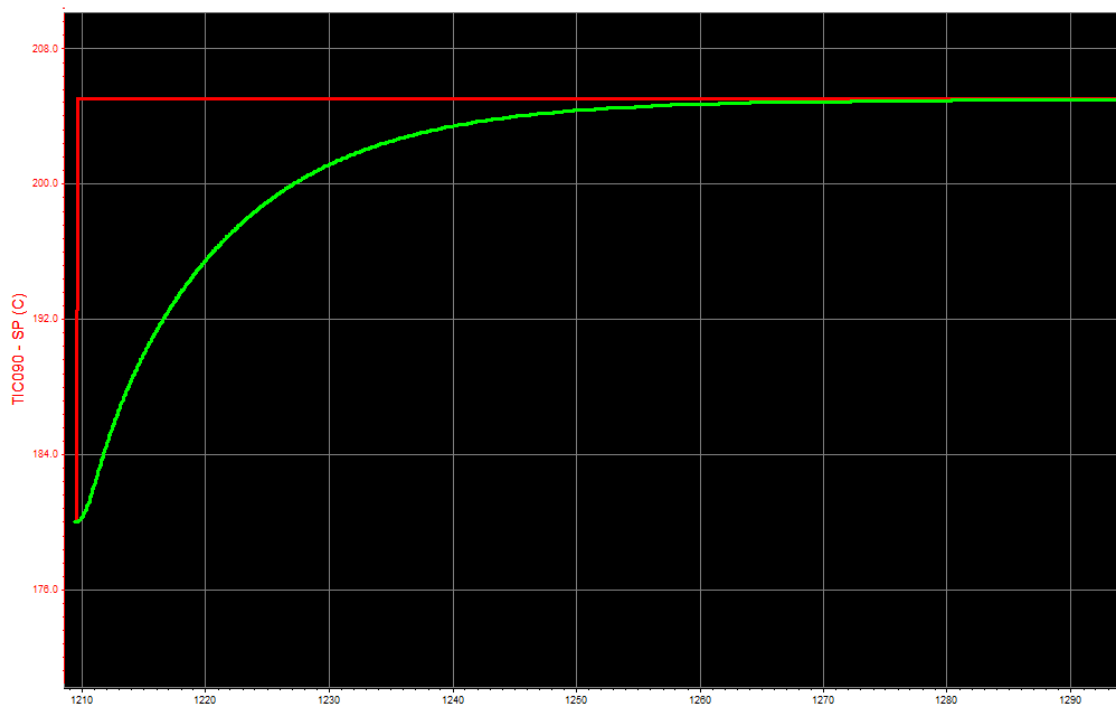


Figura 39: Resposta de la temperatura de sortida del corrent de procés amb els controladors de temperatura i cabal ajustats de forma manual

Com es pot observar, la resposta obtinguda finalment ha estat estable. Com es pot observar, la resposta del sistema no es pot categoritzar com ràpida, ja que una de les condicions que han de complir aquest tipus d'operacions unitàries és la de no augmentar en més de 50 °C per hora la temperatura, ja que és la velocitat considerada adequada com per tal que l'estructura del forn no pateixi pel brusc canvi de temperatura. En el cas mostrat, la temperatura passats 30 minuts no ha augmentat més de 25 °C i, per tant, es considera que el controlador canvia la velocitat a la velocitat adequada.

- PIC012: Aquest controlador és l'encarregat de controlar el flux d'aire del forn. Aquesta vàlvula normalment es controla de forma manual. Tot i això, també es pot fixar un valor de pressió interna al forn i permetre que es mantingui de forma automàtica. Per fer-ho, s'encarrega de controlar l'apertura de la vàlvula PV012. A causa de les característiques que necessita aquesta zona del forn, quan la pressió a l'interior del forn augmenta, és necessari obrir la vàlvula per permetre reduir la pressió interna. Aquest comportament indica que el controlador s'ha de configurar de forma directa. A més a més, cal recordar que la vàlvula sobre la qual actua aquest controlador està configurada per quedar oberta en cas d'emergència. Això modifica la seva forma d'actuar lleugerament, ja que quan el controlador doni una sortida del 100%, la vàlvula es tancarà. Per tant, per tal que el controlador pugui treballar de forma correcta, cal col·locar el seu funcionament en invers.

Per altra banda, per a configurar els paràmetres que permeten el control automàtic en primer lloc s'intenta realitzar mitjançant l'eina *Autotunner*, però a causa de les característiques de funcionament del forn, aquesta funció no proporciona cap resultat. Aquest fet obliga, per tant, a realitzar l'ajust de forma manual, intentar aconseguir un sistema suficientment estable.

El resultat d'aquest ajust és el mostrat a la **Figura 40**.

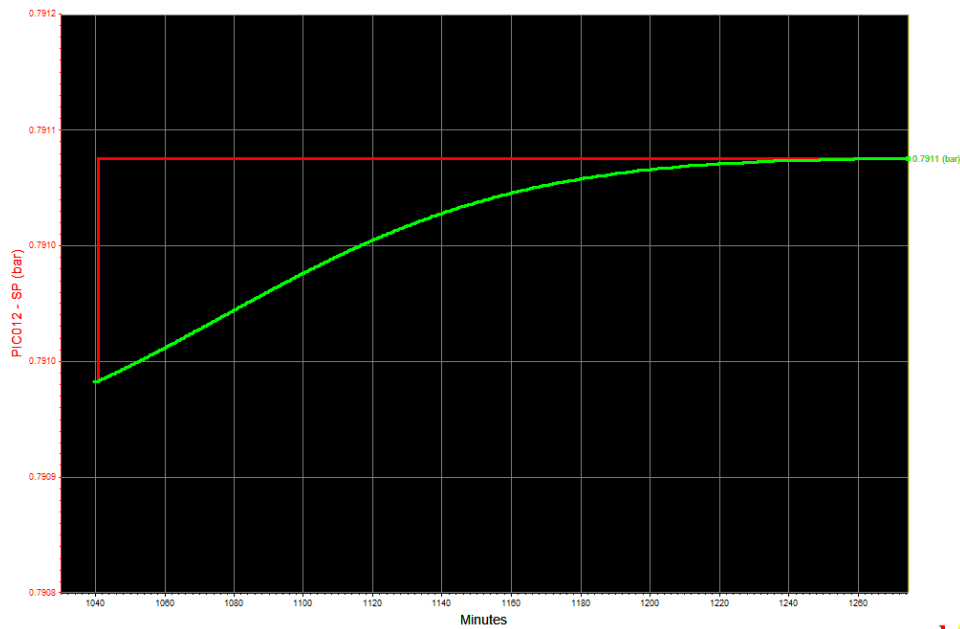


Figura 40: Resposta de la pressió amb el controlador PIC012 configurat de forma manual

- **FIC100:** Finalment, cal controlar el flux de la línia de procés que entra al forn. Per fer-ho, s'utilitza aquest controlador sobre la vàlvula FV100. En aquest cas, si s'analitza el comportament desitjat sobre el sistema, s'arriba a la conclusió que és necessari un comportament invers. Quan el valor PV és major al SP, és necessari reduir l'apertura de la vàlvula.

Per configurar els paràmetres del PI, es fa servir l'autotunner incorporat en el mòdul. El resultat que proporciona són a la **Figura 41**.

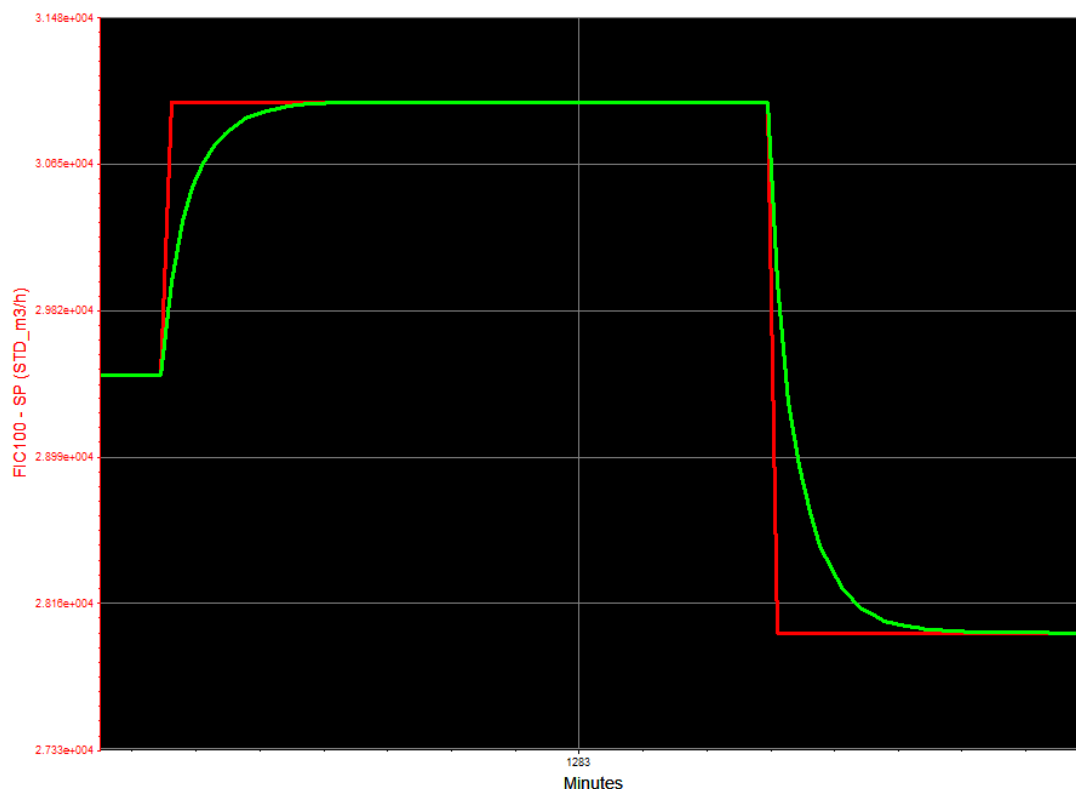


Figura 41: Resposta del controlador FIC100 amb els valors calculats

- Controlador de relació: El forn utilitzat és un forn de convecció natural. Això significa que cal controlar el cabal d'aire de forma que s'assembli al que passaria a la realitat. Per aquest motiu, cal comprendre com canvia el flux d'aire durant el procés de funcionament. Quan el forn comença a escalfar-se, l'entrada d'aire augmenta, ja que l'increment de temperatura origina canvis de densitat en l'aire. Per tant, a mesura que el forn va escalfant-se, el cabal d'aire que circula també ho fa. A més a més, la posició de la vàlvula d'escapament també influeix en el cabal d'aire que circularà pel forn.

Durant la posada en marxa dels pilots, el sistema ha de permetre major quantitat d'aire en circulació, ja que la temperatura augmenta amb cada pilot que s'encén. Un cop el forn està en funcionament, es decideix col·locar el controlador en mode automàtic amb l'objectiu de que el mateix PI tingui la velocitat adequada com per incrementar l'aire a mida que el forn funciona.

Per tant, mitjançant un spreadsheet es va modificant l'entrada d'aire (**Figura 42**).

	A	B
1		
2	PV012	100.00
3	Ratio Controller OP	20.61
4	VLV-116 OP	20.61
5	Pilot A Lit On	1.000
6	Pilot B Lit On	1.000
7	Pilot C Lit On	1.000
8	Pilot D Lit On	1.000
9	Nº of Pilots	4.000
10	Controller Mode	2 - Auto
11	OP Start-up Pilots	<empty>
12	Ratio Controller SP	20.00 deg

Figura 42: Spreadsheet per simular l'entrada d'aire mitjançant convecció natural

Com es pot observar, s'ha importat l'estat de la vàlvula d'escapament, la OP del controlador i l'estat dels pilots.

Quan hi ha menys de tres pilots en marxa, el mode de control del controlador és manual. La seva apertura de forma normal és de 0,5%, ja que sempre hi ha circulació d'aire. Quan els pilots comencen a encendre, la casella B11 augmenta el seu valor lleugerament, simulant la major circulació d'aire que es genera per aquest fet. Un cop hi ha tres o més pilots encesos, el controlador passa a estar en mode automàtic, important un SP determinat.

La fórmula utilitzada per escollir aquest SP és a l'equació (Eq. 5.9).

$$= @if(b10 \Rightarrow 2, 20 * \frac{b2}{100}, -32767) \quad (\text{Eq. 5.9})$$

Tal com es veu a (Eq. 5.9), quan el mode es automàtic, el valor de consigna desitjat (20 cops més aire que gas) és multiplicat per el grau d'apertura del dàmpfer. A major apertura, major SP. Quan el mode de treball no és automàtic, el valor del SP passa a ser <empty>, representat amb aquest valor al software de simulació.

Per altra banda, aquest sistema de control té un punt feble. Quan el sistema s'apagués de forma sobtada, l'entrada d'aire també ho faria a causa del canvi de mode a manual. Per arreglar-ho, es decideix condicionar aquest control d'aire a l'estat del forn. Quan el forn s'apaga, el sistema continua estant en mode automàtic, reduint de forma gradual el cabal. Un cop el sistema està reiniciat, el mode canvia de nou a mode manual.

Pel que fa a les constants del PI que actuen en mode automàtic, s'ha configurat amb la intenció que sigui un controlador lent, igual que ho és l'augment de temperatura al forn. Per aquest motiu, no s'ha fet servir l'autotuner en aquest controlador.

El resultat és el que es mostra a la **Figura 43**.

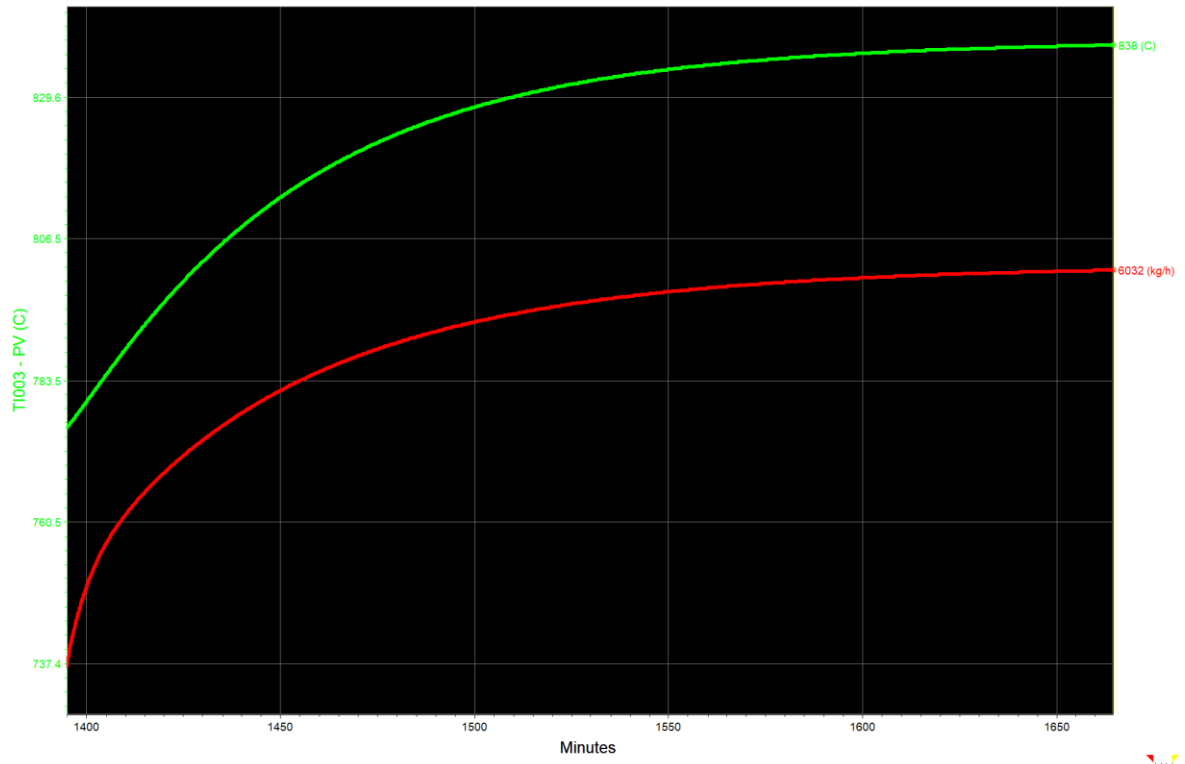


Figura 43: Resposta del controlador de cabal d'aire (corba vermella) davant d'un augment de temperatura en el forn (corba verda)

Com es pot observar, la resposta del controlador davant d'un canvi de temperatura és la d'afegir de forma lenta aire en el sistema i, alhora, mantenint l'exigència de relació gas – aire 1:20.

5.4.2.2. Alarmes

Taula 16: Resum de les alarmes incorporades en el sistema

Indicador/Controlador	Nom de l'alarma	Tipus d'alarma	Conseqüència	Valor límit
PI005	PSLL005	Molt baixa	Crítica	81,2 kPa
	PSL005	Baixa	Avís	83,5 kPa
	PSH005	Alta	Avís	220,5 kPa
	PSHH005	Molt alta	Crítica	259 kPa
PI010	PSLL010	Molt baixa	Crítica	83,9 kPa
	PSL010	Baixa	Avís	88 kPa
	PSH010	Alta	Avís	140,5 kPa
	PSHH010	Molt alta	Crítica	172,2 kPa
AI003	ASH003	Alta	Avís	10%
	ASHH003	Molt alta	Crítica	25%
FIC100	FSL100	Baixa	Avís	28440 STD m ³ /h
	FSLL100	Molt baixa	Crítica	26892 STD m ³ /h
TI003	TSH003	Alta	Avís	860 °C
	TSHH003	Molt alta	Crítica	925 °C
PI011	PSH011	Alta	Avís	2 mmH ₂ O
	PSHH011	Molt alta	Crítica	4 mmH ₂ O
TIC090	TSH090	Alta	Avís	320 °C
	TSHH090	Molt alta	Crítica	380 °C

Els sistemes no poden només ser controlats amb controladors, sinó que és necessari afegir un nivell de protecció superior com són les alarmes, les quals permetran posteriorment prendre decisions a partir del seu estat. Per fer-ho, cal utilitzar els diferents sensors del procés per a poder determinar el valor de la variable i quan aquest sobrepassi el valor determinat, activar-se.

Per simular les alarmes es fa ús del mòdul *Digital control point*. Aquest mòdul permet encendre o apagar un indicador en funció del valor que prengui la variable a controlar.

Existeixen quatre tipus d'alarmes que poden activar-se en el sistema: Molt alta, alta, baixa i molt baixa. Normalment, les alarmes alta i baixa són avisos de perill mentre que les extremes són alarmes crítiques que indiquen la necessitat d'aturar el funcionament.

- Línia de cremadors: La línia de cremadors necessita quatre alarmes diferents per evitar que el valor de pressió (i per tant de cabal) siguin massa baixos o massa elevats i condicionin el bon funcionament d'aquests aparells. Els valors de pressió crítiques són establerts a 81,2 kPa i 259 kPa mentre que els d'avís s'estableixen a 83,5 kPa i 220,5 kPa.
- Línia de pilots: Igual que a la línia de cremadors, aquesta també necessita quatre alarmes per controlar la pressió. En aquest cas, el rang és menys ampli que en el cas anterior, a causa de les dimensions dels pilots. Els valors de les pressions crítiques s'estableixen a 83,9 kPa i 172,2 kPa. Per altra banda, les alarmes d'avís s'estableixen a 88 kPa i 140,5 kPa.

A continuació, a la **Figura 27** es poden observar la posició d'aquests indicadors.

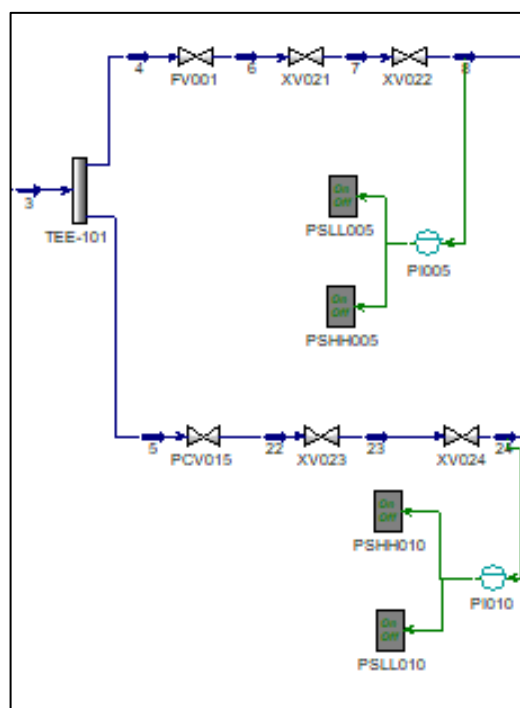


Figura 44: Indicadors i alarmes de pressió a les línies de cremadors i pilots

- Entrada del compost de procés: L'entrada del producte de procés necessita ser controlada. Si aquesta variable disminueix massa, la temperatura del forn pot augmentar de forma perillosa. Per això és necessari afegir dues alarmes de baix nivell, una d'avís i una altra crítica. Aquestes segons les dades proporcionades ha d'establir-se a un valor de 28440 STDm³/h i 26892 STDm³/h respectivament.
- Temperatura del forn: Per protegir el sistema de temperatures excessives, es col·loquen dues alarmes a la paret de la zona convectiva, la qual no està preparada per resistir temperatures excessivament elevades. Aquestes alarmes corresponen a una d'avís i una crítica. El valor que s'ha establert a partir del qual l'alarma queda activada és de 860 i 925 °C respectivament. Aquests valors es troben prou allunyats de la temperatura de fusió aproximada de l'acer, la qual es troba al voltant d'un valor de 1300 °C. L'alarma s'activa en un valor prou allunyat per a assegurar que les característiques de l'acer no canviïn de forma significativa i posin en perill l'estructura de l'equip.
- Pressió interior del forn: Tal com s'ha comentat anteriorment, aquest paràmetre és d'especial importància monitorar-lo com que pot indicar un mal funcionament del forn. És per aquest motiu que s'incorpora una alarma a aquest indicador. El valor de caiguda de pressió que activa l'alarma crítica és a 4 mmH₂O i el d'avís s'estableix 2 mmH₂O.
- Acumulació de gas: Tal com ha passat amb les darreres alarmes, aquesta també té una alarma d'avís i crítica. Els valors respectius d'aquestes alarmes són 10 %LEL i 25 %LEL.

5.4.2.3. Control de les vàlvules XV

Per a les vàlvules de pas de combustible, és necessari afegir un conjunt de sistemes lògics que permetin encendre i apagar les diferents vàlvules. Per fer-ho, és necessari utilitzar diferents mòduls i variables. A continuació es mostra un exemple a partir del qual s'explica la funció de cada mòdul (Veure **Figura 45**).

- HS011: Es tracta del senyal que vindrà del panell de control de l'usuari que permet l'apertura de la vàlvula. Quan l'usuari demani que la vàlvula s'obri, aquesta variable prendrà el valor 1.
- HS012 Auto: Aquest senyal s'encarrega també de l'apertura de la vàlvula, amb la diferència que aquest no ve per ordres de l'usuari, sinó per ordres de la seqüència automàtica.
- HS013: Aquest senyal és la que s'activa quan l'usuari demana tancar la vàlvula. Quan l'usuari vol tancar, pren per valor 1.
- Trip-Close Burners: Aquest senyal s'encarrega de tancar la vàlvula en cas d'emergència. Quan el forn entra en estat d'excepció pren valor 1.

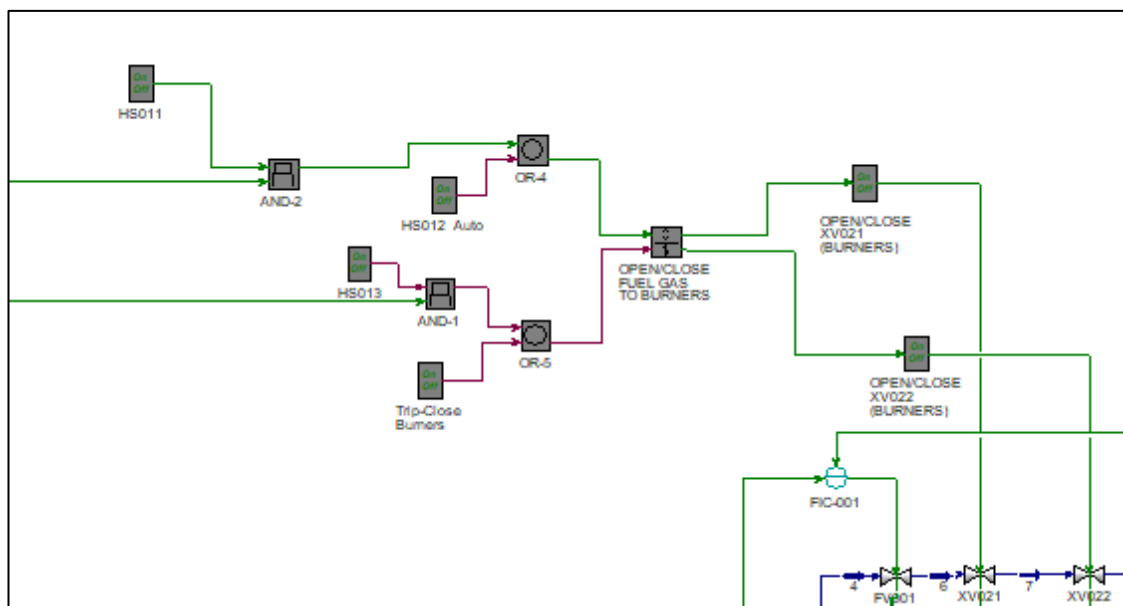


Figura 45: Exemple de la lògica utilitzada per a l'apertura i el tancament de les electrovàlvules

Aquests senyals, han d'entrar en un mòdul LATCH. Existeixen diferents tipus de LATCH, però el que ve inclòs al software és el corresponent a un RS LATCH. Aquesta unitat opera amb només dues entrades; una per SET (S) i una per RESET (R). La sortida (Q) depèn dels valors d'aquestes dues entrades. La taula de la veritat d'aquesta unitat és la mostrada a la **Taula 17**.

Taula 17: Taula de la veritat del mòdul LATCH utilitzat en el sistema

Senyal 1 (S)	Senyal 2 (R)	Sortida (Q)
0	0	Estat anterior
1	0	1
0	1	0
1	1	Indeterminat

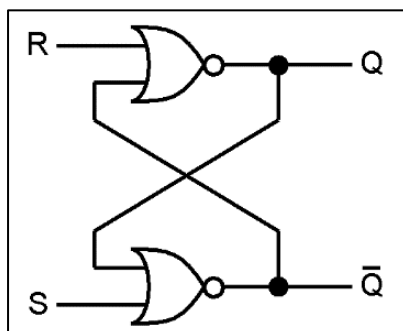


Figura 46: Portes lògiques NOR que formen el mòdul RS LATCH inclòs a AspenHysys

A partir de la **Taula 17** es pot observar com en el cas de que ambdues entrades es trobin en estat 1, el sistema queda indeterminat. En aquest cas, el propi software permet especificar quina de les dues senyals té preferència en aquest tipus de situacions incertes i degut a que es tracta de vàlvules de control de gas, en cas de dubte, s'especifica que la senyal RESET tingui preferència.

Aquest sistema és el que es correspon al conjunt de portes lògiques NOR (portes lògiques OR que neguen a la sortida) mostrat a la **Figura 46**. Per tant, degut a que en el sistema té dos possibles entrades SET i dues RESET, i el sistema té diverses entrades, cal introduir abans portes lògiques OR.

Finalment, la sortida d'aquesta unitat es connecta a mòduls *Digital Control Point* per connectar-los posteriorment als actuadors de posició desitjada de les vàlvules (*Actuator Desired Position*).

Aquest sistema és el que s'utilitza en totes les electrovàlvules del sistema, és a dir, les vàlvules que permeten l'accés de combustible a les línies de cremadors i pilots així com les pròpies vàlvules individuals d'aquests aparells (4 cremadors i 4 pilots).

Tot i això, si analitzem el funcionament d'aquest sistema, es pot observar com realment aquest sistema necessita dos botons diferents en el sistema: un botó per encendre la vàlvula i un per apagar-la. Aquest sistema no és molt útil a la pantalla, ja que aquesta mateixa funció la podria realitzar un sol botó. Per aquest motiu, mitjançant un Spreadsheet es decideix realitzar una modificació d'aquest funcionament.

Es decideix que els valors de les variables que corresponen a l'acció manual HS011 i HS013 (a l'exemple mostrat a la **Figura 45**) depenguin d'una variable que serà la que realment interactuarà amb l'usuari. Quan l'usuari vulgui obrir una vàlvula, aquesta variable prendrà valor 1. Això farà que els valors que prenen les variables HS011 i HS013 siguin 1 i 0 respectivament. En cas de que l'usuari demani tancar les vàlvules (és a dir, la variable que interactua amb l'usuari pren valor 0), els valors d'HS011 i HS013 prendran els valors 0 i 1 respectivament. Amb aquest sistema, l'usuari pot controlar amb un sol botó l'estat de les diferents vàlvules del sistema. A la **Figura 47** es mostra l'Spreadsheet on es fa aquesta modificació. Per altra banda, per evitar errors en l'apertura de vàlvules, és necessari afegir un sistema que bloquegi els botons manuals en cas de que el sistema es trobi en mode automàtic. Per fer això, les electrovàlvules reben la senyal d'un indicador que permet conèixer el mode de treball del forn. (Veure apartat **Nivell supervisor**).

-@IF(I34=0,0,1)

	F	G	H	I	J
25					
26					
27					
28					
29		HS017	1.000	1.000	
30		HS003	0.0000	0.0000	
31		HS015	0.0000	0.0000	
32		HS007	1.000		1.000
33		HS009	0.0000		
34		HS011	1.000		1.000
35		HS013	0.0000		
36					

Valors que prenen les variables
HS011 i HS013 en funció de la
variable present a I34

Variable que modifica l'usuari

Figura 47: Exemple de configuració de les variables d'accionament i tancament de les electrovàlvules

5.4.2.4. Detector de posició de vàlvula

En el sistema descrit, és necessari confirmar que l'estat de les vàlvules és el correcte. En el sistema real, la posició de les diferents vàlvules les confirmen els PLC. En el model, aquesta funció es simula mitjançant els mòduls *Digital Control Point*. Aquests mòduls, els quals s'han fet servir a les alarmes, controlen la variable de les vàlvules *Actuator Current Position*.

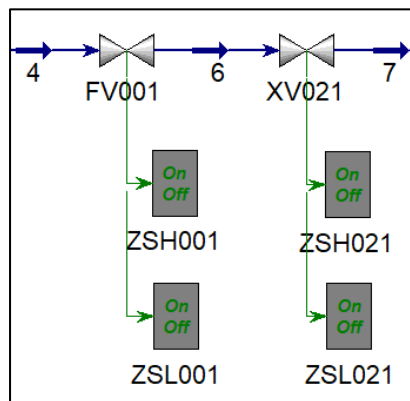


Figura 48: Indicadors de confirmació de posició de la vàlvula

Per indicar la posició, es fan servir dos indicadors per vàlvula: un per indicar que està completament tancada, el qual s'indica amb la nomenclatura ZSLxxx i els quatre dígits identificadors de la vàlvula, i un altre per indicar que està totalment oberta, fent servir ZSHxxx.

5.4.3. Sistemes de protecció

Un nivell superior de control és la protecció del sistema. Tal com s'ha comentat en diversos apartats anteriors, el sistema ha d'aturar-se de forma automàtica en el moment en el qual una part del sistema es troba fora del rang considerat segur. En aquest apartat es pretén explicar tota la part de la simulació relacionada amb la protecció del sistema.

5.4.3.1. Causes d'aturada d'emergència

Tal com s'ha comentat en apartats anteriors, és necessari controlar algunes variables del sistema amb especial atenció. Això es reflecteix amb la introducció d'alarmes en el sistema. Tot i això, algunes alarmes han de tenir alguna conseqüència en el funcionament del forn quan queden enceses. Això cal simular-lo mitjançant un Spreadsheet.

SHUT-DOWN CAU...		Alarm value	Bypass order
ASHH003	0 - Off	0.0000	1.000
PSHH005	0 - Off	0.0000	0.0000
PSLL005	0 - Off	0.0000	0.0000
TSHH003	0 - Off	0.0000	0.0000
PSHH011	0 - Off	0.0000	0.0000
ZSL021	0 - Off	0.0000	0.0000
PSLL010	0 - Off	0.0000	0.0000
FSL0100	0 - Off	0.0000	0.0000
TSHH090	0 - Off	0.0000	0.0000
ZSL022	0 - Off	0.0000	0.0000
ZSL023	0 - Off	0.0000	0.0000
ZSL024	0 - Off	0.0000	0.0000
Nº Pilots <=2	4.000	0.0000	0.0000
Nº Burners <=2	4.000	0.0000	0.0000
HEATER TRIP		0.0000	
TRIP RESET		0.0000	

Figura 49: Secció de l'Spreadsheet que controla l'estat de les alarmes per entrar en TRIP (emergència)

A la **Figura 49** es pot observar la secció del Spreadsheet que s'encarrega de realitzar aquesta funció. Es poden observar quatre columnes. La primera correspon al nom del motiu pel qual l'alarma s'activa. La segona, és l'estat actual de dita alarma. La tercera correspon a la senyal de l'alarma que atura el forn i la quarta a la senyal que ordena realitzar el bypass. En determinades situacions, no és perillós que una alarma es trobi activa, ja que és normal que, per exemple, durant l'engegada s'activin. Per evitar que el forn s'aturi en un moment en el que no hauria de fer-ho, s'utilitza un bypass, el qual no és més que desviar la senyal per a que no activi el sistema de seguretat. Aquest ordre de fer el bypass és controlada

per una seqüència automàtica (*Event Scheduler*) que s'explicarà en apartats posteriors (Veure **5.4.4.3 Event Scheduler**).

Per altra banda, el senyal de la columna *Alarm Value* pren valor 0 quan se sol·liciti fer un bypass o el valor de l'alarma en cas que no en tingui.

Cal comentar que els motius pels quals s'atura el forn són les alarmes crítiques explicades a l'apartat **Alarmes**, a més a més d'altres que també cal contemplar:

- Vàlvules de pas de combustible a les línies de pilots i cremadors tancades durant el funcionament (ZSL021, ZSL022, ZSL023 i ZSL024 enceses).
- Nombre de cremadors i/o pilots en funcionament inferior a 3 durant el funcionament.

Per tant, si qualsevol d'aquestes alarmes s'encén (amb bypass apagat), la casella *Heater Trip* passa a tenir un valor d'1. Aquesta alarma, posteriorment activarà la seqüència d'apagada d'emergència.

5.4.3.2. Sistema de reconeixement d'alarmes

Quan una de les alarmes anteriors s'activa, el forn queda en parada d'emergència. Tot i això, hi ha vegades que el fet d'apagar el forn soluciona el motiu que originava l'aturada d'emergència. El problema és que quan una alarma queda activada, el forn ha de quedar aturat fins que l'usuari s'encarregui de reiniciar tot el sistema. Per complir aquesta funció, la senyal HEATER TRIP mostrada a l'Spreadsheet de la **Figura 49** és introduïda en un mòdul LATCH, tal i com es pot observar a la **Figura 50**.

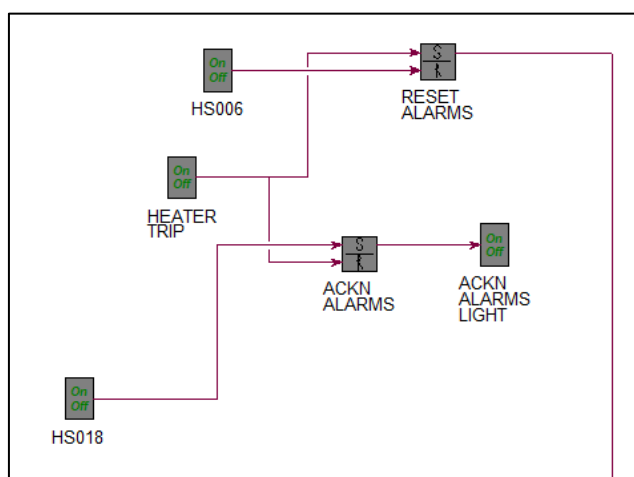


Figura 50: Secció de l'AspenHysys que correspon al sistema d'aturada d'emergència

El mòdul RS LATCH anomenat RESET ALARMS pren valor 1 quan el forn entra en TRIP. Gràcies al mòdul LATCH (veure taula de la veritat mostrada a **Taula 17**), tot i que la senyal s'apagui, la senyal de sortida

continuarà en l'estat anterior. La única forma d'apagar l'alarma és fent ús del botó HS006, el qual un cop activat, reinicia la senyal de sortida.

Per altra banda, per reiniciar, és necessari fer saber al sistema que l'usuari sap les alarmes que han originat la situació d'emergència. Per fer-ho, es fa servir, de nou, un mòdul LATCH. En aquest cas, HEATER TRIP és el senyal SET. Aquest sistema permet que, quan hi ha una parada, com aquest LATCH queda activat, l'usuari ha d'apagar-lo manualment per mostrar coneixement de la situació. Per fer-ho, ha de reiniciar aquest mòdul amb el botó HS018.

5.4.3.3. Vàlvules en posició d'emergència

Durant els diferents subapartats d'aquesta secció de simulació, s'han introduït diferents vàlvules en el sistema. Una de les variables que es van configurar va ser la posició de fallida. Aquesta posició de fallida no entra en acció de forma automàtica, sinó que és necessari indicar d'alguna forma com ha d'actuar. Per fer-ho, es configura de la següent forma (Veure **Figura 51**).

FAIL POSITION		
FI001	1.000	0 - Not Failed
XV021	1.000	0 - Not Failed
XV022	1.000	0 - Not Failed
XV023	1.000	0 - Not Failed
XV024	1.000	0 - Not Failed
XV025A	1.000	0 - Not Failed
XV025B	1.000	0 - Not Failed
XV025C	1.000	0 - Not Failed
XV025D	1.000	0 - Not Failed
XV026A	1.000	0 - Not Failed
XV026B	1.000	0 - Not Failed
XV026C	1.000	0 - Not Failed
XV026D	1.000	0 - Not Failed
PV012	1.000	0 - Not Failed

Figura 51: Configuració de les posicions de fallida del les diferents vàlvules

De la mateixa forma que amb les alarmes, hi ha moments en els quals cal col·locar una vàlvula en posició de fallida de forma intencionada. Per fer-ho, cal que el mateix sistema tingui una sèrie de variables que permetin realitzar aquesta operació. Aquesta funció la realitzen els valors de la columna B. Per altra banda, si s'observa la columna C, es veu com el seu valor es calcula mitjançant la funció (Eq. 5.10), la qual té la taula de la veritat mostrada a **Taula 18**.

$$= 1 - b37 * (1 - c69) \quad (\text{Eq. 5.10})$$

Taula 18: Taula de la veritat per a la posició de fallida de les vàlvules del model

Valor de la <u>columna B</u>	<u>C69</u> : Sortida del LATCH RESET ALARMS mostrat a la Figura 50	<u>SORTIDA</u> (Posició de la vàlvula)
0	0 (NO TRIP)	1 (Posició de fallida)
0	1 (TRIP)	1 (Posició de fallida)
1	0 (NO TRIP)	0 (Posició normal)
1	1 (TRIP)	1 (Posició de fallida)

Com es pot observar, independentment del valor de la columna B, si el forn entra en aturada d'emergència, les vàlvules es posicionaran en la dita posició.

Cal esmentar que la vàlvula que representa la sortida dels fums treballa d'una forma lleugerament diferent. Aquesta vàlvula se li aplica un condicional. Si el forn no es troba en funcionament normal (és a dir, fa 10 minuts que treballa), s'apliquen les condicions mostrades anteriorment. En cas contrari, quan el forn està treballant en estat normal, no entra en fallida.

5.4.4. Nivell supervisor

Finalment, tots els altres nivells inferiors de control necessiten ser controlats amb un nivell encara superior de control. En aquest apartat s'explicarà el control mitjançant seqüències utilitzat.

5.4.4.1. Mode manual i automàtic

En primer lloc, cal esmentar que el procés d'encendre el forn és una operació que segueix una seqüència. Tot i això, aquesta pot ser realitzada de forma manual per l'operari o mitjançant una seqüència automàtica. En aquest apartat s'explica el sistema realitzat per decidir el tipus de seqüència utilitzat.

Per indicar al forn el mode en el qual es troba, cal introduir una sèrie de variables que permetran interactuar i mostrar aquest canvi. Aquesta part es mostra a la **Figura 52**.

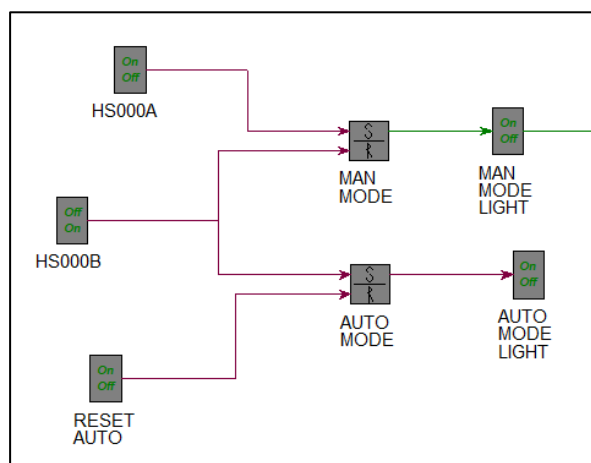


Figura 52: Part de la lògica encarregada d'indicar el mode de treball de la simulació

Com es pot observar, per realitzar aquesta part de la simulació s'han utilitzat de nou les operacions RS LATCH. En aquest cas, el botó HS000A permet col·locar en marxa el mode manual i el botó HS000B el mode automàtic. De la mateixa forma que s'ha realitzat amb les electrovàlvules, en aquest cas també s'utilitzarà un botó per realitzar tota aquesta operació. Quan l'usuari sol·liciti el mode Manual (0), els interruptors HS000A i RESET AUTO s'activaran i, alhora, HS000B passarà a valer 0. De forma contrària, quan l'usuari sol·liciti mode automàtic (1), els valors d'HS000B passarà a ser 1, mentre que RESET AUTO i HS000A valdran 0.

El senyal MAN MODE LIGHT s'envia a totes les electrovàlvules, de forma que els botons per obrir i tancar de forma manual només funcionin en cas que el mode sigui manual, evitant situacions contradictòries entre ambdós modes.

5.4.4.2. Etapes per engegar el forn

Per aquesta part de la simulació és necessari en primer lloc recordar les etapes per les quals passa el forn durant la posada en marxa explicades a l'apartat **Característiques del sistema**.

L'usuari necessita conèixer en tot moment en quina fase del procés es troba el forn i per això cal configurar en alguna part del model una sèrie de variables que permetin conèixer aquest estat. Per fer-ho es fa ús d'un Spreadsheet (Veure **Figura 53**).

UL002	0.0000	0.0000	READY TO PURGE
UL004	0.0000	0.0000	PURGE IN PROGRESS
UL006	0.0000	0.0000	PURGE FAILURE
UL008	0.0000	0.0000	PURGE COMPLETED
UL010	0.0000	0.0000	PILOTS READY TO START
UL012	0.0000	0.0000	BURNERS READY TO START
UL014	0.0000	0.0000	HEATER TRIP
UL016	0.0000	0.0000	BURNER TRIP
UL018	1.000	1.000	NORMAL OPERATION
UL020	0.0000	0.0000	READY FOR RESET
UL038	1.000	1.000	MANUAL MODE ACTIVE
	0.0000	0.0000	WAITING
	0.0000 seconds	10.00 seconds	WAITING TIME
	0.0000 seconds		

Figura 53: Spreadsheet que simula els llums que mostraran a l'usuari l'estat del forn

Com es pot observar, existeixen quatre columnes per simular aquesta part del sistema. A la primera columna es mostra el nom de l'indicador i a la quarta la descripció.

Per altra banda, la segona columna és la que es modificarà mitjançant una seqüència per passar d'un estat a un altre. Tot i això, si s'observa correctament aquesta columna, es pot observar com existeixen valors no modificables (color negre). Aquest són els que corresponen a HEATER TRIP, READY FOR RESET i el MANUAL MODE.

- HEATER TRIP: Sortida del LATCH RESET ALARMS (Veure **Figura 50**).
- READY FOR RESET: Sortida de LATCH ACKN ALARMS (Veure **Figura 50**).
- MANUAL MODE: Sortida de LATCH MAN MODE (Veure **Figura 52**).

La tercera columna s'encarrega d'interpretar la informació de la segona i la situació del forn. A les primeres caselles d'aquesta columna, fins a NORMAL OPERATION, el valor que pren és el mateix que dicta la casella de la columna 2, sempre que el valor HEATER TRIP no valgui 1, és a dir, sempre que el forn no estigui en parada d'emergència. En aquesta situació, tots aquests llums quedarien apagats.

Per altra banda, el botó *Ready for Reset* necessita un comportament lleugerament diferent. Quan la casella de la segona columna val 1, vol dir que el forn es troba aturat per emergència i l'usuari no ha avisat del coneixement de la situació, per tant, el forn en aquestes condicions mai es trobarà llest per reiniciar l'operació, i marcarà sempre 0 aquesta casella. De forma contrària, si l'usuari reinicia el LATCH ACKN ALARMS, el valor de la casella passarà a ser el de HEATER TRIP, és a dir, el mateix que l'estat del forn. Si el forn es troba en parada, la casella del TRIP estarà en 1 i, si l'usuari ja ha avisat que coneix les alarmes, la llum READY TO RESTART podrà il·luminar-se (Valor 1). De forma contrària, si el forn no es troba en TRIP, el valor de la casella serà 0, ja que no hi ha res a reiniciar.

Per altra banda, la llum WAITING té el mateix comportament que les primeres caselles d'aquesta mateixa columna. Finalment, es poden observar unes caselles completament diferents. La seva funció és actuar com a temporitzador. El forn, per poder considerar-se que es troba en un funcionament normal, és necessari que es trobi en funcionament 10 minuts seguits sense problemes. Per comptar aquest temps, s'utilitza aquesta casella, la qual importa el valor de temps de la seqüència de l'Event Scheduler d'espera corresponent (Veure apartat **Event Scheduler** de les pàgines mostrades a continuació). Aquesta dada importada s'encarrega de comptar 600 segons (10 minuts), és a dir, és un comptador. Degut a que per a l'usuari es considera millor opció un temporitzador, aquest valor es transforma per a poder mostrar-lo amb el format desitjat (és a dir, en minuts i marxa enrere).

5.4.4.3. Event Scheduler

Taula 19: Resum de les seqüències utilitzades a la simulació

Seqüència	Etapes	Activació
Procés d'engegada del forn	<i>Ready to Purge</i>	Vàlvules tancades
	<i>Start Purge</i>	Botó activat
	<i>Purge completed</i>	Vàlvules tancades i temps de purga complert
	<i>Pilots ready to start</i>	Vàlvules tancades i <i>damper</i> obert
	<i>Burners ready to start</i>	3 pilots engegats
	<i>Waiting</i>	3 cremadors engegats
	<i>Heater Normal Operation</i>	Esperar 10 minuts
Bypass	PSLL010	5 minuts després d'obrir el pas de combustible als pilots
	PSLL005	5 minuts després d'obrir el pas de combustible als cremadors
	ZSL021 i ZSL022	2 segons després d'obrir les vàlvules
	ZSL023 i ZSL024	2 segons després d'obrir les vàlvules
<i>Heater Trip</i>	<i>Heater Trip</i>	Alarma crítica activa o vàlvula tancada (sense bypass)
<i>Purge Failure</i>	<i>Purge Failure</i>	Alarma ASHH003 activa durant 15 segons durant la purga
<i>Start-up time expired</i>	<i>Start-up time expired</i>	2 hores sense que el forn quedi en operació normal
<i>Automatic Start-up</i>	<i>Initialize Ready to Purge</i>	5 segons després de mode <i>AUTO</i>
	<i>Pilot line pressuation</i>	Senyal <i>Pilots Ready to start</i> activa
	<i>Start Pilot A</i>	10 segons sense alarma de pressió alta ni baixa a la línia
	<i>Start Pilot B</i>	20 segons sense alarma de pressió alta ni baixa a la línia

	<i>Start Pilot C</i>	20 segons sense alarma de pressió alta ni baixa a la línia
	<i>Start Pilot D</i>	20 segons sense alarma de pressió alta ni baixa a la línia
	<i>Burner line pressuation</i>	Senyal <i>Burners Ready to start</i> activa
	<i>Start Burner A</i>	5 segons sense alarma de pressió alta ni baixa a la línia
	<i>Start Burner B</i>	1 minut sense alarma de pressió alta ni baixa a la línia
	<i>Start Burner C</i>	1 minut sense alarma de pressió alta ni baixa a la línia
	<i>Start Burner D</i>	1 minut sense alarma de pressió alta ni baixa a la línia
	<i>Reset Signals</i>	Esperar 5 segons

A diferents apartats d'aquest projecte s'ha parlat de realitzar seqüències. Aquestes seqüències s'expliquen en aquesta part del projecte.

En primer lloc, explicar que una seqüència són una sèrie d'esdeveniments i accions que s'han de realitzar quan es compleixen unes condicions. En aquest cas, s'han realitzat 6 seqüències diferents: Procés d'engegada del forn, senyals de bypass, parada de la seqüència d'engegada, purga fallida, Temps per iniciar el forn fallit i seqüència automàtica. A continuació es procedeix a explicar cadascuna d'aquestes seqüències per separat.

➤ Procés d'engegada del forn

Aquesta seqüència està formada per 7 esdeveniments diferents. Aquests esdeveniments corresponen a les diferents etapes per a engegar el forn que han estat explicades a l'apartat **Característiques del sistema**:

- **Ready to Purge:** Per a començar la purga, és necessari que les vàlvules del sistema es trobin tancades. Això significa que no hi ha circulació de gas a les línies corresponents. Quan aquestes condicions es compleixen durant cinc segons, s'encén el llum del panell, es realitza un bypass a les alarmes de baixa pressió i de nombre de cremadors, per evitar que el forn entri en aturada en aquest procés d'arrancada. A més, per poder purgar és necessari que el sistema obri la vàlvula de sortida de fums, per fer que circuli aire per l'interior. Per fer-ho, es col·loca en fallida aquesta vàlvula.
- **Start purge:** Per a començar a purgar, l'única condició que cal complir és que l'usuari polsi el botó corresponent a realitzar aquesta acció. Quan això passa, la llum de purga en procés s'encén, apagant la llum prèvia. A més a més, es permet que circuli més aire per l'interior del mateix forn. Per fer-ho, es canvia la mínima posició de la vàlvula d'entrada d'aire a 2,5% i s'activen les seqüències que s'explicaran posteriorment de fallida de purga i de temps expirat. A més a més, per evitar que durant la purga s'activi la parada d'emergència, es fa un bypass a aquesta alarma.
- **Purge Completed:** Per aquesta part de la simulació, es comprova que durant un minut la vàlvula de pas de combustible als cremadors (que són els que són capaços d'introduir gran quantitat de combustible a la cambra del forn) estigui tancada. Si això succeeix, s'apaga el llum anterior i s'encén el de purga completa. Paral·lelament, la vàlvula de pas d'aire canvia la seva posició mínima a 0,5% i la vàlvula d'escapament de fums deixa d'estar en posició de fallida.
- **Pilots Ready to Start:** Els pilots es trobaran llestos per ser encesos sempre que la purga hagi estat completada amb èxit. A més a més, és necessari que totes les vàlvules excepte la vàlvula d'escapament es trobin tancades. Si tot això passa durant 5 segons, el bypass de l'alarma ASHH003 s'apaga (ja partia d'un estat encès), s'apaga el llum de purga completa i s'encén la de pilots preparats per arrancar.
- **Burners Ready to Start:** Els cremadors podran arrancar sempre que hagin tres pilots com a mínim encesos, la sortida de fums estigui tancada i a més a més, els cremadors no tinguin circulació de combustible pel seu interior. Quan això succeeix durant 5 segons, el sistema indica que els cremadors estan llestos per ser encesos, apagant la llum de l'estat anterior.
- **Waiting:** Aquesta etapa és certa quan tres cremadors i tres pilots com a mínim es troben encesos i les alarmes estan apagades. Si això passa, el llum anterior s'apaga, s'encén el llum d'espera i el bypass al nombre de cremadors i pilots s'apaga.
- **Heater Normal Operation:** Aquest esdeveniment té com a objectiu comprovar que les condicions anteriors es mantenen durant 10 minuts. Si això passa, la llum anterior s'apaga i s'avis a l'usuari que el forn treballa de forma normal.

➤ Senyals bypass

Aquesta seqüència és la que s'encarrega de realitzar els bypass a les vàlvules en el moment necessari. Alguns d'aquests bypass s'han realitzat directament amb la seqüència principal, per assegurar que no es passava d'una etapa a una altra sense que es fes el bypass. Tot i això, hi ha d'altres que no estan vinculades directament a l'etapa del procés d'arrancada, i cal realitzar una seqüència per activar-les. Aquestes alarmes són les següents:

- PSLL010 i PSLL005: Aquestes alarmes són les que s'encarreguen d'avisar que la pressió de les línies de pilots i combustible respectivament són baixes. Cada alarma té el seu propi esdeveniment, tot i que les condicions per activar-les són les mateixes, però amb la diferència de quan s'activa cada bypass.
Durant la posada en marxa dels pilots i cremadors, és comú que aquestes alarmes puguin encendre's i, per tant, per evitar que el sistema s'apagui, és necessari realitzar aquest bypass a les dos senyals. Aquest bypass, en condicions normals està activat. És 5 minuts després d'obrir les corresponents vàlvules de pas de combustible quan el bypass queda desactivat, temps suficient per haver engegat tots els pilots i cremadors.
- ZSL021, ZSL022, ZSL023 i ZSL024: Aquests senyals són la confirmació del PLC de què la corresponent vàlvula de pas de combustible a la que representen es troba tancada. Cada senyal té el seu propi esdeveniment. Inicialment, aquests senyals es troben completament aïllades, ja que si el sistema es troba apagat, no és necessari que el forn s'apagui de nou per emergència. Aquests bypass s'apaguen 2 segons després que la vàlvula quedi oberta, moment en el qual si es tanca alguna, s'apaga el forn.

➤ Seqüència d'apagada d'emergència

Aquesta seqüència és la més senzilla i alhora important de tota la simulació. Només consta d'un esdeveniment: Si la casella HEATER TRIP s'activa quan les alarmes sense bypass es troben enceses, la seqüència de posada en marxa queda aturada i s'apaguen tots els llums. En aquest moment en el qual tot ha quedat apagat, es reinicia la seqüència amb l'objectiu de poder reiniciar el procés de nou. A més a més, com probablement els senyals bypass han quedat desactivats en algunes de les seqüències anteriors, és necessari activar aquests bypass de nou.

➤ Seqüència de purga fallida

Aquesta seqüència es troba activa només durant la purga. El que pretén realitzar aquest senyal és que si l'alarma ASHH003 es troba activa durant aquest procés un temps de 15 segons (El forn no aturaria la seqüència, ja que es troba amb un bypass), la purga no queda completa i s'il·lumina el senyal de purga fallida. En aquest instant es reinicia la seqüència d'engegada del forn per tornar a començar el procés de nou.

➤ **Seqüència de temps d'engegada expirat**

Durant l'engegada del forn, existeix la possibilitat que es realitzi la purga i el procés d'engegada no acabi de realitzar-se. És per això que cal incorporar una seqüència que reinici tot el procés si això succeeix. Aquesta seqüència queda activa si en un temps de dues hores el forn no es troba en condicions de treball normals. Si això succeeix, els llums informatius s'apaguen i tota la seqüència queda reiniciada.

➤ **Seqüència d'engegada automàtica**

Aquesta seqüència és l'encarregada de realitzar tot el procés de posada en marxa de forma automàtica. Aquesta seqüència s'encarrega només de realitzar les accions que hauria de realitzar l'usuari durant l'engegada del forn. Totes aquestes accions permetran complir les condicions dels diferents esdeveniments de la seqüència d'engegada del forn.

A continuació es mostra els esdeveniments que la componen:

- **Inicialitzar el senyal *Ready to Purge***: Aquest esdeveniment queda activat 5 segons després que l'usuari canviï el mode de treball a automàtic. En aquest instant, la primera seqüència explicada (**Procés d'engegada del forn**) s'activa i alhora, es mana iniciar la purga.
- **Pressurització de la línia de pilots**: Quan la purga queda completa, el senyal que queda activa és la de pilots llestos per encendre. És quan aquest senyal està activa que les vàlvules de pas de combustible a la línia de pilots s'obren.
- **Encendre Pilot A**: Quan l'esdeveniment anterior es compleix, si cap alarma de pressió ha quedat encesa durant un temps de 10 segons, s'envia el senyal d'encendre el pilot A. Tal com es va veure a l'apartat **Control de les vàlvules XV**, la seqüència automàtica no fa servir els mateixos interruptors que la manual. En aquest cas, el pilot s'encén fent servir el botó per a la seqüència automàtica.
- **Encendre Pilot B, C i D**: Per encendre aquests pilots es fan servir tres esdeveniments diferents, un per cada pilot. Tot i això, tots tres tenen la mateixa funció: Esperar 20 segons després que el pilot anterior hagi estat encès per engegar el següent.
- **Pressurització de la línia de combustible**: Igual que succeeix amb la línia de pilots, si el senyal de cremadors llestos per arrancar es troba encesa durant 5 segons, les vàlvules de pas de combustible s'obren. En aquesta situació, cal recordar que també cal obrir la vàlvula FV001 per permetre el pas del gas natural. Aquesta apertura inicialment és del 5%.
- **Encendre cremador A**: Aquest cremador s'encén sempre que cap alarma de pressió a la línia es trobi engegada durant 5 segons. A més, quan aquest cremador està obert és necessari canviar l'apertura de pas de combustible al 10%

- Encendre cremador B, C i D: Aquests cremadors s'encenen mitjançant esdeveniments diferents. La seva funció és encendre el cremador corresponent, sempre que les alarmes de pressió no estiguin actives i esperant un minut que s'encengui el cremador anterior. Tot i això, és necessari permetre un major flux de gas a través de la línia. Per això, l'apertura es modificarà a mida que els cremadors s'encenguin a un 40%, a un 50% i a un 70% respectivament.
- Reinici dels senyals: Aquest últim esdeveniment té com a únic objectiu reiniciar tots els botons utilitzats en aquest mode, amb l'objectiu que després, en mode manual, no quedin dos senyals contradictòries en els mòduls LATCH utilitzats. Per a fer-ho, simplement s'espera 5 segons que l'últim cremador quedi activat.

6. Validació del model

Un cop el model està realitzat, és necessari comprovar la seva estabilitat. Com que la simulació és matemàtica, és necessari comprovar que no es desestabilitza davant de pertorbacions en el sistema. Existeixen diverses formes de realitzar aquest procés, tot i que les que s'utilitzen per a aquest tipus de procés són bàsicament dos: Aplicar pertorbacions al sistema i apagar-lo i tornar-lo a encendre. A continuació es mostra el procés de cadascun per comprovar els límits del model.

6.1. Pertorbacions

Per a comprovar que el sistema es estable davant a pertorbacions es procedeix a canviar la consigna (SP) d'algunes de les variables. En aquets cas, es considera que la variable que pot pertorbar més el sistema és el cabal de procés. Aquesta variable afecta a la temperatura de sortida, al cabal de combustible, a les pressions de les línia i del forn així com al cabal d'aire. Per fer-ho, es parteix d'un sistema ja en estat estacionari amb un cabal d'entrada de 29450 STDm³/h. Aquest cabal a continuació es demana que baixi fins a un valor de 27000 STDm³/h. Com es pot observar a la **Figura 54**, el sistema quan s'exigeix una reducció, té un comportament estable i no oscil·lant. Cal esmentar que el gràfic mostrat a la **Figura 54** no té com objectiu conèixer el valor de la variable amb el temps, sinó observar que la resposta del sistema no oscil·la. És per aquest motiu que en un mateix gràfic es representen totes les variables, amb l'objectiu de controlar en una sola pantalla el desenvolupament de totes les variables importants.

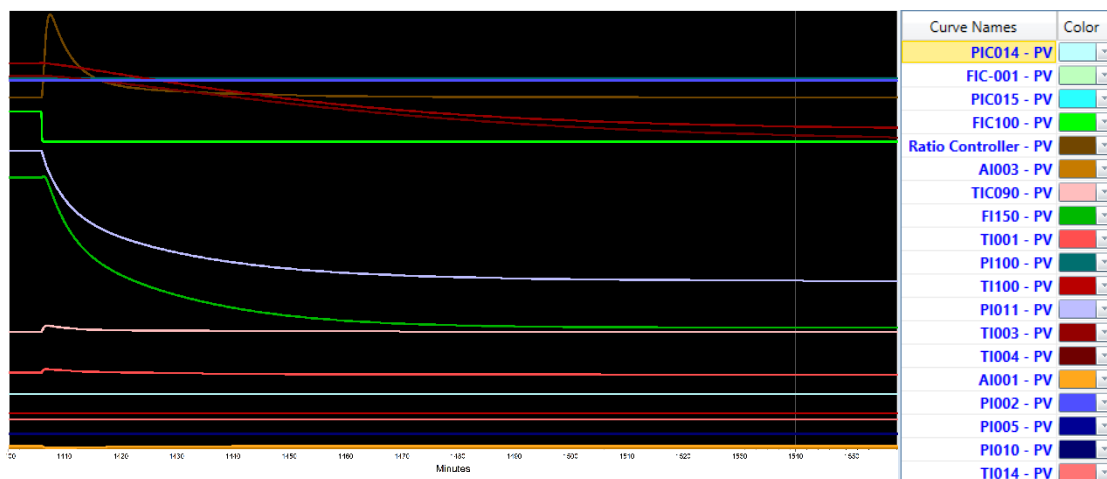


Figura 54: Resposta del sistema davant de pertorbacions

6.2. Reiniciar el sistema

Una altra comprovació que cal dur a terme en el sistema és el comportament del sistema quan s'apaga i s'encén. Aquest procés és el que més desestabilitza el model en el cas de no ser prou robust, ja que les variables pateixen grans canvis en curts intervals de temps. A la **Figura 55**, es pot observar com és la resposta del sistema quan s'apaga el forn. Com es pot observar, totes les variables evolucionen sense perdre l'estabilitat. Les corbes que redueixen el seu valor en forma d'esglaó corresponen a totes les variables de cabal o pressió que es veuen afectades pel tancament instantani de vàlvules. Per altra banda, és necessari comentar la reacció del controlador *Ratio Controller*, el qual degut a la absència de cabal de gas i a que sempre circula aire per l'interior del forn, la relació aire/fuel es veu augmentada de forma considerable. La resta de variables es pot observar com evolucionen amb un comportament de primer ordre.

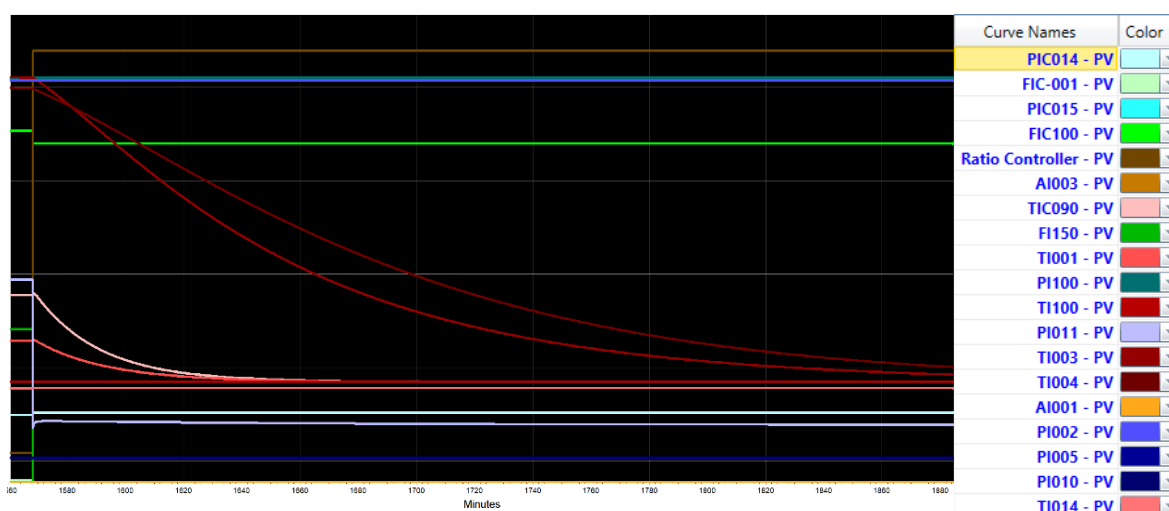


Figura 55: Resposta del model quan el sistema és apagat

Si a continuació es posa en marxa el forn, es pot observar la resposta mostrada a la **Figura 56**.

De la imatge es veu com existeix al voltant del minut 2020 (zona blava) un comportament estrany de totes les variables. Això és perquè per poder posar en marxa el sistema és necessari augmentar de forma manual el cabal de gas cap als cremadors, generant aquests canvis ràpids en les variables. Tot i això, es pot observar com les variables es comporten de forma estable.

Per tant, el model és capaç d'arrancar i ser encès amb normalitat i resisteix els diferents canvis de consigna que poden realitzar-se. Per tant, el model està llest per poder elaborar la corresponent OTS.

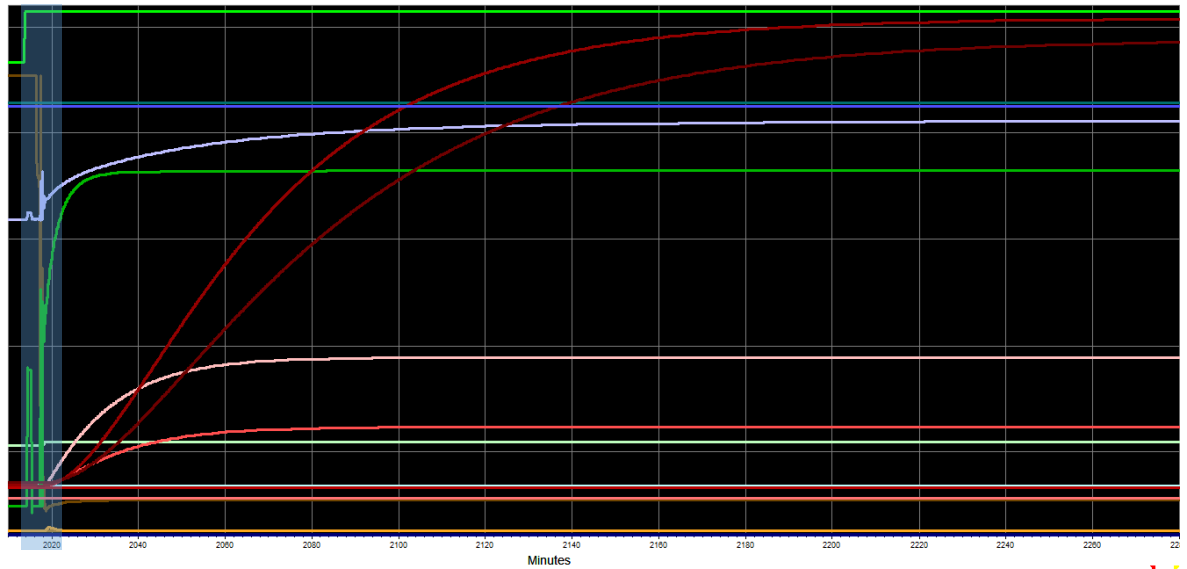


Figura 56: Resposta de les variables del sistema quan el sistema s'encén

7. Interfície d'usuari

Per a la realització d'una OTS és necessari una interfície d'usuari (GUI) que permeti conèixer i manipular les diferents variables del sistema. Per realitzar aquesta funció, a la indústria es fan servir SCADA.

Els SCADA es podrien considerar l'últim esglaó del control supervisor, ja que és finalment el que permet a l'usuari dur el control total de la planta.

Aquestes interfícies normalment disposen de clients OPC que serveixen per connectar amb la planta industrial real. Aquest tipus de connexió es realitza mitjançant etiquetes que permeten la connexió entre planta i interfície. Per altra banda, tots els dispositius es connecten al servidor OPC que s'encarrega de comunicar-se amb el client corresponent.

7.1. Què és un OPC?

OPC és un protocol de comunicació de dades que permet comunicar tots els dispositius de la planta en un mateix tipus d'estàndard, facilitant la seva interpretació. (14)

Històricament, cada fabricant disposava dels seus protocols propis que dificultaven la connectivitat entre les diferents parts dels sistemes. Aquest estàndard permet que tots aquests dispositius intercanviïn dades sense conèixer res dels respectius protocols de comunicació natius de la resta de parts del sistema.

El seu funcionament es basa conceptualment en el que es mostra a la **Figura 57**.

La comunicació entre les fonts de dades i els clients de dades es realitza mitjançant dos components: el client OPC i el servidor OPC. És necessari remarcar que els dispositius locals no deixen de tenir els seus respectius protocols, simplement el client i servidor OPC permeten la «traducció» perquè s'entenguin.

El servidor OPC és l'encarregat de dur a terme la traducció entre el llenguatge OPC i els protocols natius de les fonts de dades. Els servidors són connectors bidireccionals, capaços de llegir i escriure als dispositius de les fonts.

Per altra banda, el client OPC és el software creat amb la finalitat de comunicar-se amb el servidor OPC. Aquest s'encarrega de traduir les peticions de comunicació d'una aplicació a la petició que necessita rebre el servidor OPC i viceversa. (15)

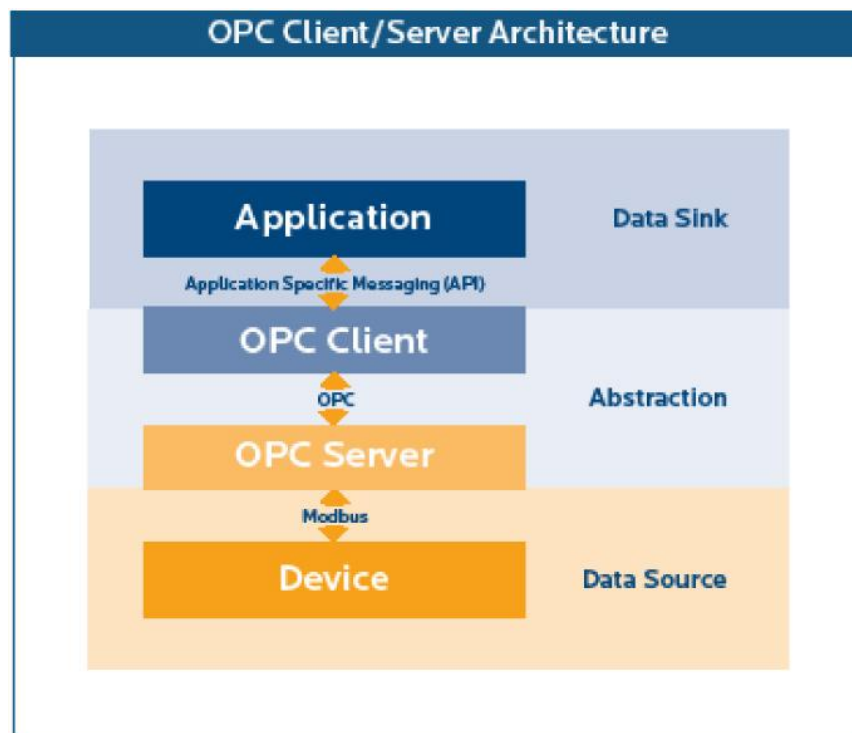


Figura 57: Arquitectura Client-Servidor OPC (15)

7.2. *Inprocess Instructor Station*

En el cas que ens ocupa, la interfície no es connecta amb la planta real, sinó que es connecta directament amb el model, que actuarà de planta.

En el mercat actual existeixen una gran quantitat de software amb la capacitat de dur a terme aquesta funció. Tot i això, *Inprocess Technology And Consulting Group* té el seu propi software per a realitzar aquest tipus de funció. Aquest software, anomenat *Inprocess Instructor Station* (IIS), és lleugerament diferent de la resta dels presents en el mercat actual. La principal diferència és que aquest programa està enfocat a connectar directament la simulació d'un software comercial. Això no vol dir que el software no tingui la capacitat de realitzar una connexió a una planta real, sinó que la forma d'enfocar el sistema SCADA està desenvolupat a treballar amb un simulador.

A més a més, tal com s'ha comentat, el software SCADA és el que disposa del client OPC, mentre que la planta necessita connectar-se al servidor OPC.

El software utilitzat va un pas més endavant en aquest aspecte. Com que no tots els simuladors comercials disposen de servidor OPC que permeti la comunicació amb el client, el software IIS s'encarrega de realitzar aquesta mateixa funció.

El software IIS està format per dos mòduls principals, el *Runtime*, el qual és l'ambient d'execució i l'editor, que permet la programació gràfica d'aquest ambient.

7.3. Comunicació entre AspenHysys i IIS

Taula 20: Resum de les variables a exportar de la simulació

Nom de la llista	Tipus de variable	Mode d'exportació
ALARMS	Alarmes	Lectura
VALVES	Posició de les vàlvules (ZSHxxx)	Lectura
	Apertura de les vàlvules	Lectura
LIGHTS	Llums del panell (ULxxx)	Lectura
BUTTONS	Botons (HSxxx)	Lectura/escriptura
IND&CONT	PV	Lectura
	OP	Lectura/escriptura
	SP	Lectura/escriptura
	Mode	Lectura/escriptura
BYPASS	Estat del bypass	Lectura
FAIL_VALVES	Estat de la vàlvula	Lectura

Per realitzar la comunicació entre els dos softwares, és necessari identificar cadascuna de les variables amb una etiqueta (TAG) a ambdós programes que permeti la seva identificació.

Aquest procés a HYSYS es realitza fent servir *Data Tables*. Aquesta part del software permet afegir la variable a exportar, posar-li una etiqueta i concedir el tipus de permís. Aquest permís pot ser de lectura, lectura i escriptura o només d'escriptura. En funció de la variable, es decideix fer servir unes o altres. Les variables que cal exportar es poden classificar de forma general en sis grans grups: Alarmes, vàlvules, llums, botons, indicadors/controladors i bypass. Per aquest motiu, es decideix crear sis llistes diferents, una per cada tipus de variable. A continuació s'explica breument com es configura cadascuna d'aquestes variables:

- **Alarmes:** Durant aquest projecte s'ha explicat que existeixen diverses variables que poden comprometre de forma greu l'estat de la planta en cas d'assolir certs valors establerts. Per aquest motiu, és important exportar aquest tipus de variables per aconseguir mostrar a l'usuari l'estat de cadascuna d'aquestes variables. Com que aquest tipus de variables només pretenen informar de l'estat de la planta, la variable s'exporta en mode lectura, és a dir, l'usuari no pot canviar l'estat de les alarmes interactuant directament sobre ella. La configuració d'un *Data table* es mostra a la **Figura 58**.

	Object	Variable	Value	Units	Tag	Access Mode
1	PSHH005	OP State	0.0000		PSHH005	Read
2	PSHH010	OP State	0.0000		PSHH010	Read
3	PSLL010	OP State	0.0000		PSLL010	Read
4	PSHH011	OP State	0.0000		PSHH011	Read
5	TSHH090	OP State	0.0000		TSHH090	Read
6	TSHH003	OP State	0.0000		TSHH003	Read
7	FSL100	OP State	0.0000		FSL100	Read
8	PSLL005	OP State	0.0000		PSLL005	Read
9	ASH003	OP State	0.0000		ASH003	Read
10	ASHH003	OP State	0.0000		ASHH003	Read
11	PSH005	OP State	0.0000		PSH005	Read
12	PSH010	OP State	0.0000		PSH010	Read
13	PSH011	OP State	0.0000		PSH011	Read
14	PSL005	OP State	0.0000		PSL005	Read
15	PSL010	OP State	0.0000		PSL010	Read
16	TSH003	OP State	0.0000		TSH003	Read
17	FSL100	OP State	0.0000		FSL100	Read
18	TSH090	OP State	0.0000		TSH090	Read

Etiqueta per exportar la variable

Mode en el que s'exporta

Figura 58: Exemple de *Data table* utilitzada per exportar les variables d'*AspenHysys*

- **Vàlvules:** En el cas de les vàlvules, la variable que cal exportar depèn del tipus. Les electrovàlvules necessiten les variables de posició. Com que només poden trobar-se en dues posicions, només fa falta exportar una de les variables de posició configurades: les de posició tancada (ZSL) o les de posició oberta (ZSH). En aquest cas, s'ha escollit exportar en tots els casos les de posició oberta. Per altra banda, existeixen vàlvules amb un comportament diferent. Les vàlvules pneumàtiques a les línies de procés (FV100) i de combustible (FV001), tenen diferents posicions. Per aquest motiu, la variable que cal exportar és la seva apertura. En canvi, la vàlvula de sortida de fums, anomenada *Damper*, permet diferents valors, però les seves posicions més importants són totalment obert o tancat. Per això, en aquest cas cal exportar les dues variables de posició de la vàlvula (ZSL012 i ZSH012). Tota aquesta informació té l'objectiu d'informar de l'estat de les vàlvules, per això s'exporten en mode lectura.
- **Llums:** Els llums són totes aquelles variables destinades a informar de l'estat del forn. Aquest tipus de làmpades són les que tenen la nomenclatura ULxxx. Com que la seva funció és informar de l'estat del forn, s'exporten en mode Lectura.
- **Botons:** Els botons són la part del simulador amb la que més es pot interactuar a la simulació. Això és perquè serveixen per controlar l'estat de diferents vàlvules o començar diferents processos del sistema. És per aquest motiu que aquest tipus de variables necessiten ser

exportades en mode lectura i escriptura alhora. Els botons són totes les variables que tenen la nomenclatura HSxxx.

- Indicadors i controladors: Pels indicadors, és necessari exportar el valor PV. Aquest valor és un valor de lectura. Tot i això, els controladors necessiten quatre variables diferents que cal exportar: la PV, el SP, la OP i el mode de treball. Els valors de PV, tal com passa amb els indicadors, s'exporta en mode lectura. Les variables SP i OP depenen del mode de treball. En mode automàtic, l'OP no pot ser modificada mentre que SP sí que pot ser-ho. En mode manual, passa el contrari. Per aquest motiu, ambdues variables cal que siguin exportades en mode lectura i escriptura. Finalment, el mode de treball també ha de ser exportada en mode lectura i escriptura.

Una altra variable que es decideix exportar és el temps d'espera per arribar a operació normal (veure **Procés d'engegada del forn**)

- Bypass: Una de les variables que es decideix exportar és el bypass de les alarmes, amb la finalitat que posteriorment l'usuari entengui correctament el sistema. Normalment aquesta informació no s'ha d'exportar però, que es tracta d'un element formatiu, és necessari afegir-ho per entendre el sistema.
- Posició de fallida de les vàlvules: Quan una alarma crítica s'activa, les vàlvules entren en la seva posició de fallida. A les vàlvules pneumàtiques això no es representa, per a les vàlvules solenoide sí que és necessari. Per fer-ho, cal exportar les variables que indiquen aquesta posició.

Un cop la simulació està llesta, s'inicia un nou projecte al software IIS fent servir el mode de treball *Editor*. Per al disseny d'aquesta part, s'ha de partir d'una configuració local, és a dir, sense connectar mitjançant OTS. Posteriorment, quan tot el sistema es trobi configurat i testejat, es procedirà a realitzar els canvis que permetran la connexió Client – Servidor.

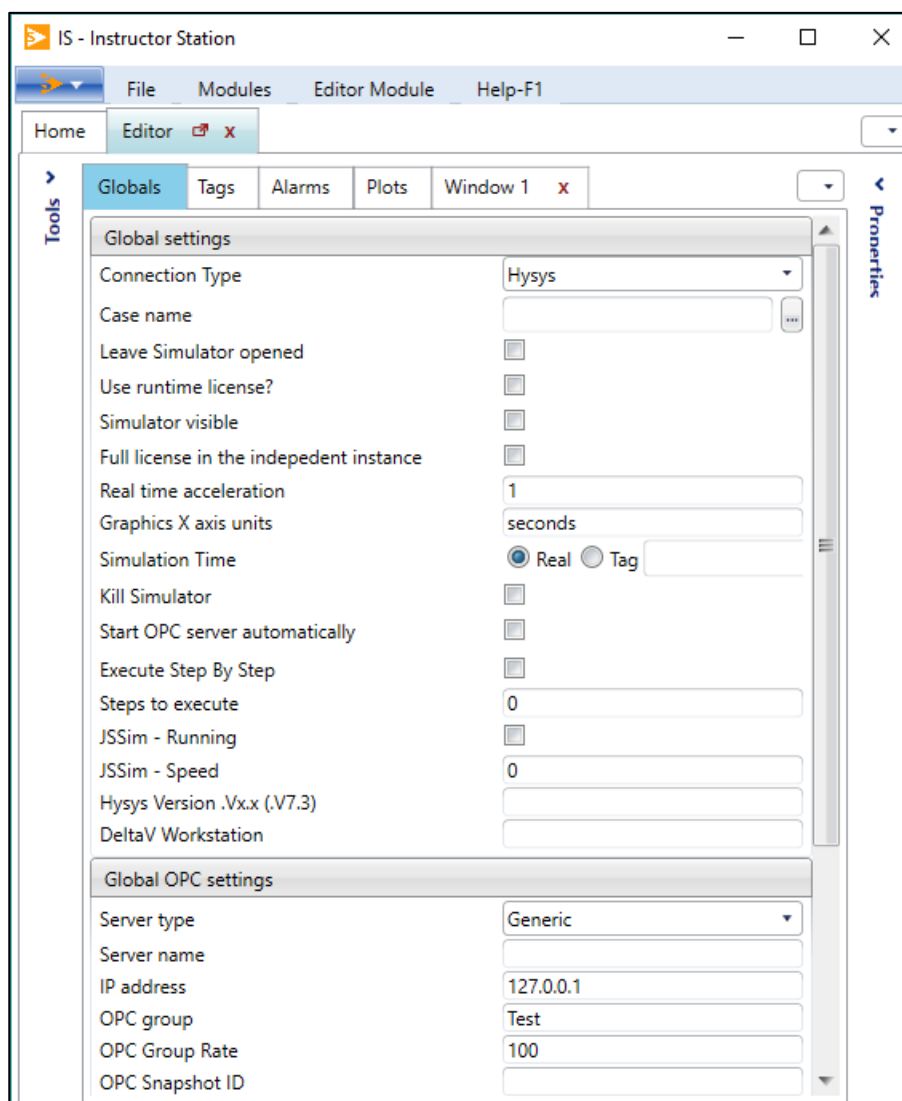


Figura 59: Configuració inicial de l'editor per al projecte

A continuació, cal especificar el software amb el qual es connecta el programa. En aquest cas, s'ha d'escollir Hysys, tot i que si es realitzés la simulació amb un altre software, només caldria canviar aquesta pestanya, mantenint el mateix nom a les etiquetes exportades.

A continuació, cal introduir les etiquetes de les variables exportades a Hysys. Per a la configuració, cal introduir les dades mostrades a la **Figura 60**, a la **Figura 61** i a la **Taula 21**.

Globals Tags Alarms Plots Fired Heater x			
+ Add new tag X Delete all tags			
Editor Name	PAR1	PAR2	Tag Name
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> AI003_PV	ProcessDataTable	IND&CONT	AI003_PV
<input checked="" type="checkbox"/> TI003_PV	ProcessDataTable	IND&CONT	TI003_PV
<input checked="" type="checkbox"/> TI004	ProcessDataTable	IND&CONT	TI004_PV
<input checked="" type="checkbox"/> PI011_PV	ProcessDataTable	IND&CONT	PI011_PV

Figura 60: Introducció de les diferents etiquetes de les variables de la simulació (Part 1)

Globals Tags Alarms Plots Fired Heater x							
+ Add new tag X Delete all tags							
Master?	Sim Var Type	Sim Var Unit	Low Limit	High Limit	Default Value	Num Dec	Is Co
<input type="checkbox"/>							
<input type="checkbox"/>	%LEL	0	0	0	1		
<input type="checkbox"/>	°C	0	0	0	1		
<input type="checkbox"/>	°C	0	0	0	1		
<input type="checkbox"/>	mmH2O	0	0	0	2		

Figura 61: Introducció de les diferents etiquetes de les variables de la simulació (Part 2)

Globals Tags Alarms Plots Fired Heater x						
+ Add new tag X Delete all tags						
ue	Num Dec	Is Constant	Historify?	Is Part Of?	PI Definition	Tooltip
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	▼ Definition	
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	▼ Definition	
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	▼ Definition	
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	▼ Definition	

Figura 62: Introducció de les diferents etiquetes de les variables de la simulació (Part 3)

La informació que cal afegir a cada variable és mostrada a la **Taula 21**.

Taula 21: Informació que cal introduir a IIS per a la configuració de les etiquetes (tags)

Nom de la columna	Descripció
<i>Editor Name</i>	Nom únic utilitzat a IIS per identificar variables. En aquest cas s'utilitza el mateix nom que al simulador (<i>Tag Name</i>).
<i>PAR1</i>	Indica la procedència de les dades. En aquest cas, com prové d'una taula de dades cal indicar <i>ProcessDataTable</i> .
<i>PAR2</i>	Nom de la taula de dades al simulador.
<i>Tag Name</i>	Nom de l'etiqueta al simulador.
<i>Master</i>	S'utilitza a la connexió OPC. Es marca en funció de si la variable prové de la pantalla o de la simulació. (Veure apartat Conversió del projecte a arquitectura Client – Servidor).
<i>Sim Var Type</i>	Opcional. Tipus de variable a la qual es refereix el tag.
<i>Sim Var Unit</i>	Opcional. Unitats en les quals s'expressa la variable.
<i>Low Limit</i>	Valor mínim de la variable.
<i>High Limit</i>	Valor màxim de la variable.
<i>Default Value</i>	Valor inicial per a l'etiqueta.
<i>Num Dec</i>	Nombre de decimals que es mostren en pantalla.
<i>Is Constant</i>	Indica si el valor d'aquesta variable no varia. En aquest cas, cap variables és constant.
<i>Historify?</i>	Quan està activat, el programa guarda el valor del tag a l'historial.
<i>Is Part Of?</i>	Quan està activat, l'etiqueta és inclosa en els càlculs de l'índex de rendiment.
<i>PI Definition</i>	L'usuari pot definir com influeix un tag en l'índex de rendiment. Pot escollir entre l'opció integral, la qual utilitza directament el valor per fer el càlcul, o el límit, que utilitza un rang per definir el rendiment.
<i>Tooltip</i>	Opcional. Informació per a l'usuari quan posa el cursor a sobre de la variable.

7.4. Elaboració de l'esquema de la planta (GUI)

Un cop el programa està configurat, cal començar a dissenyar la part gràfica que visualitzarà l'usuari. El software IIS utilitzat permet introduir diferents alarmes, botons, indicadors i controladors, però no permet introduir figures i formes per a representar les diferents operacions unitàries que poden formar part d'una planta. Per tant, aquesta part es realitza amb un software extern (MS Visio) i posteriorment és introduïda en forma de fons de pantalla a l'IIS.

Com es pot observar a la **Figura 63**, l'esquema representat inclou la representació dels corrents i del forn. També es troba tota la part escrita que permet identificar els diferents botons i vàlvules del sistema.

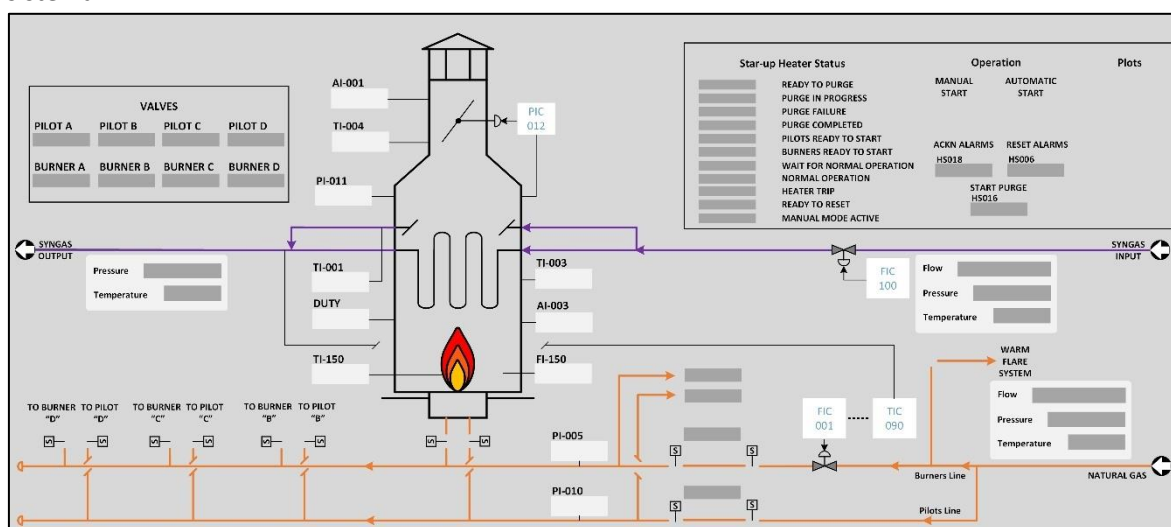


Figura 63: Esquema del forn per a la GUI de l'OTS

Les dimensions de la imatge s'ha escollit amb l'objectiu que en una pantalla de 15,6 polzades pugui veure's a pantalla completa. Les dimensions són: 1260 x 555 mm.

Com es pot observar, no tots els controladors es troben representats a la pantalla, igual que no totes les vàlvules involucrades en el procés ho estan. Com es pot observar, les vàlvules PCVxxx que s'autoregulen no es troben representades, ja que l'usuari no pot interactuar amb elles i, per tant, els controladors corresponents tampoc. Tampoc es troba representada la línia d'aire que sí que està a la simulació. Tal com s'ha esmentat durant tot el document, el forn és de convecció natural i, per tant, no existeix una línia d'aire com a tal a la realitat. Per aquest motiu, no té sentit representar aquesta línia a la interfície gràfica per a l'usuari.

Quan el fons és introduït, cal començar a completar la resta de la pantalla. Cada part del sistema necessita utilitzar un mòdul diferent. És per aquest motiu que a la **Taula 22** es mostra un resum dels diferents mòduls utilitzats per a mostrar en pantalla la informació necessària a l'usuari. Tot i això, no

existeix una única forma de realitzar aquesta funció al programa, ja que diversos mòduls poden realitzar una mateixa funció. A la **Taula 22** es mostra un resum dels mòduls utilitzats per a representar cada part del sistema.

Taula 22: Resum del mòdul utilitzat per a cada part del sistema

Variable	Mòdul IIS utilitzat
Estat de les vàlvules	<i>Alarm</i>
Llums del panell	<i>Alarm</i>
Botons	<i>On/Off Button</i>
Indicadors	<i>Label Text</i>
Controladors	<i>Controller</i>
Mode de treball	<i>Trackbar</i>
Estat de l'apertura de vàlvules pneumàtiques	<i>Level</i>
	<i>Label Text</i>
Dàmpers	<i>Alarm</i>
Temperatura ambient	<i>Trackbar</i>
Temperatura d'entrada del producte de procés	<i>Trackbar</i>
Bypass	<i>Alarm</i>
Flama del forn	<i>Alarm</i>

- **Estat de les vàlvules:** Les vàlvules poden trobar-se en diferents estats en funció del seu estat. En el cas de les vàlvules solenoide (electrovàlvules), el seu estat és obert o tancat i per tal de mostrar a l'usuari de forma visual aquesta situació, s'utilitzen mòduls *Alarm* amb l'objectiu de mostrar un canvi de color en funció del seu estat. A la **Figura 64** es mostra aquesta configuració.

Com es pot observar, cal configurar en aquest cas l'etiqueta que per met saber l'estat de l'alarma. Tal com es va explicar a l'apartat 7.3 (**Comunicació entre AspenHysys i IIS**), l'estat de les vàlvules es decideix exportar amb la variable ZSHxxxx, la qual es troba activa quan la vàlvula està completament oberta i desactivada quan no ho està. Per tant, al tractar-se de vàlvules

amb només dues posicions, si el valor és 0 (*Alarm Value 1*) cal mostrar la imatge d'una vàlvula de color vermell. En cas de que el valor sigui 1 (*Alarm Value 2*), cal mostrar una vàlvula verda. Aquesta configuració es realitza per igual amb totes aquestes vàlvules.

En el cas de la vàlvula de seguretat, el sistema és al revés. Quan aquesta està tancada, la imatge mostrada és una *Relief Valve* sense color, i en el cas de trobar-se no tancada (independentment del grau d'apertura) el color mostrat és groc.



Shape Name	al_34_ZSH026A
X	487
Y	445
Width	14.7733194372068
Height	24.417701863354
Alarm Tag	ZSH026A
Alarm Tag 2	
Default Text	Alarm
Font Family	Segoe UI
Font Auto Size	<input checked="" type="checkbox"/>
Font Size	12
Alarm Value 1	0
Alarm Fill 1	
Alarm Text 1	
Alarm Value 2	1
Alarm Fill 2	
Alarm Text 2	
Corner Radius	0

Figura 64: Configuració dels mòduls *Alarm* utilitzats per a mostrar l'estat de les vàlvules

- Llums del panell: Aquestes variables tenen fan ús, també, del mòdul *Alarm* per a ser configurades. En aquesta situació, les etiquetes que cal importar són les que tenen la forma ULxxx. Quan aquests llums estan actius es troben apagats en un color gris. De forma contrària, si s'ha d'activar, el color dependrà del tipus d'avís que proporioni. Si és un avís d'aturada d'emergència o de fallida, el color serà vermell. En cas contrari, es configura amb el color verd.



Alarm Value 1	0
Alarm Fill 1	
Alarm Text 1	UL002
Alarm Value 2	1
Alarm Fill 2	
Alarm Text 2	UL002
Corner Radius	5

Figura 65: Configuració de les llums del panell

- **Botons:** Els botons són els encarregats d'activar els actuadors de les vàlvules solenoide, d'activar la purga i reiniciar el sistema. Per manipular aquest tipus de variable s'utilitza l'eina *On/Off Button*. Aquest tipus de botó necessita dos etiquetes diferents. Una per conèixer l'estat del botó i una altra per a actuar-hi, tal i com es pot veure a la **Figura 66 (esquerra)**. Amb la configuració realitzada a la simulació, aquestes dues funcions les realitza la mateixa variable. Per altra banda, a l'igual que amb les alarmes, l'estat del botó permet canviar el seu color. En aquest cas s'han utilitzat dos tonalitats diferents de gris per mostrar la diferenciar entre On i Off. A més a més, quan el botó es troba apagat es mostra el missatge *Open* per indicar que l'acció que es realitzarà al pitjar és la d'obrir i viceversa. Aquesta configuració es mostra a la **Figura 66 (dreta)**.

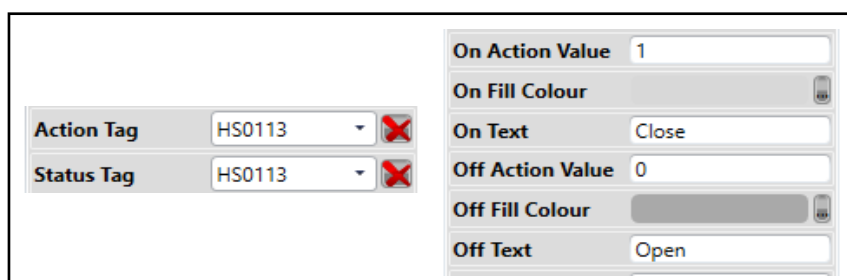


Figura 66: Secció de la configuració dels botons On/Off corresponent a les etiquetes (esquerra) i a l'estat del botó (dreta)

- **Indicadors:** Aquest mòdul és el més senzill de tots els que incorpora el software. El seu funcionament és mostrar en forma de text el contingut d'una etiqueta, incloent-hi les seves unitats. Aquest text es col·loca sobre el fons blanc utilitzat per a cada indicador.
- **Controladors:** De forma contrària, aquest mòdul passa a ser el més complicat de tots els esmentats. Aquest mòdul mostrarà un *Faceplate* del controlador a l'usuari quan el polsi. Aquest *Faceplate* és una pantalla que permet modificar i consultar les diferents variables exportades del controlador: Mode de treball, Valor de la variable de procés, OP i valor de consigna. La seva configuració es mostra a la **Figura 67 (esq)**.

Com s'observa, per configurar el mòdul cal clicar sobre l'apartat FacePlate, el qual obre una nova finestra on introduir tots els Tags. A la **Figura 67 (dreta)**, es pot observar com existeixen diversos apartats sense configurar. Això es degut a que per a l'usuari, no totes les variables han de ser manipulades i en el cas d'aquest projecte, l'usuari només pot accedir com a màxim al mode de control.

Per altra banda, el controlador mostrat a la **Figura 67** és el FIC001, el qual necessita el mode cascada un cop el sistema es troba en funcionament. Per aquest motiu, aquest controlador és l'únic del sistema representat que té aquesta opció activada.

Figura 67: Configuració del mòdul Controller

- Mode de treball:** Tal com s'ha explicat en apartats anteriors (5.4.4.1 Mode manual i automàtic) el forn disposa de dos modes per arrancar, el mode manual i l'automàtic. Per canviar d'un mode a un altre existeix un botó que permet realitzar aquest canvi. Tot i això, en aquesta ocasió no es fa servir un mòdul *On/Off Button* per a canviar d'un mode a l'altre ja que es considera una millor opció fer servir un mòdul *Trackbar*. Aquest permet canviar entre diversos estats una variable, que no tenen perquè correspondre a estats d'encès i apagat com pot fer entendre un botó. Per a configurar aquesta barra, només cal afegir l'etiqueta, el rang de valors permesos (en aquest cas 0 o 1) i la freqüència permesa. Com en aquest cas no pot haver estats intermedis, es posa una freqüència de 1. La configuració final es mostra a la **Figura 68**. Cal esmentar que a causa de les exigències dels clients, aquesta variable no es desitja modificar de moment i, per tant, es decideix bloquejar aquest control perquè l'usuari no el pugui manipular. Per fer-ho, s'introdueix un rectangle amb el color del fons i una certa transparència que impedeixi interactuar amb aquesta barra.

- Estat de l'apertura de les vàlvules pneumàtiques: Les vàlvules pneumàtiques presents en el procés tenen un grau d'apertura. És per aquest motiu que és necessari afegir un indicador que permeti conèixer quin és aquest percentatge d'apertura. Per fer-ho, s'utilitzen dos mòduls diferents: el *Level* i el *Label Text*. El *Label Text* es configura de la mateixa manera que els indicadors, fent servir en aquest cas la apertura de la vàlvula en percentatge. Tot i que amb aquesta informació seria suficient, es decideix afegir una barra de nivell que representi aquesta mateixa variable sota la vàlvula. Per configurar aquest nivell, cal saber que el mòdul disposa de dos colors per indicar el nivell en funció del valor de l'apertura. Tot i això, aquesta característica té més valor per indicar el nivell de tancs, per poder mostrar si aquest està arribant a nivells perillosos. En el cas que ens ocupa, les vàlvules no necessiten aquesta característica i, per tant, tots dos colors es configuren amb verd, tal i com s'observa a la **Figura 69**.

Tag Name	HS000A
Minimum	0
Maximum	1
Tick Frequency	1
Orientation	Horizontal

Figura 68: Configuració del mòdul *Trackbar* utilitzat per a canviar entre mode manual i automàtic

Level Tag	FV100_OP
Level Value 1	0
Level Fill 1	<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: green;"></div>
Level Value 2	0
Level Fill 2	<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: green;"></div>
Orientation	Horizontal
Min Value	0
Max Value	100

Figura 69: Configuració del mòdul *Level* per indicar l'apertura de les vàlvules

- *Damper:* La vàlvula de descàrrega o *damper* és una vàlvula pneumàtica tot i que les seves característiques obliguen a representar-la de forma diferent. Aquesta vàlvula es representa tal i com es mostra a la **Figura 70**. Tal i com s'ha comentat anteriorment, aquesta vàlvula és té una posició de fallida oberta. Degut a aquestes característiques, un indicador del grau d'apertura no és necessari ja que les úniques posicions que són importants de detectar són: totalment obert, totalment tancat i parcialment obert. Per representar aquesta característica és fan servir dues alarmes diferents. En cas de que la vàlvula estigui totalment oberta, aquesta alarma mostrarà el *damper* totalment obert (**Figura 70 esquerra**), en cas contrari serà

transparent. La segona alarma es farà servir quan la vàlvula estigui totalment tancada (**Figura 70 dreta**). Quan això succeeixi, aquesta passarà de trobar-se en color transparent a mostrar el *damper* tancat (**Figura 70 centre**). D'aquesta forma, quan el *damper* estigui parcialment obert totes dues alarmes es trobaran transparents i permetran veure la vàlvula mig oberta que està representada en el fons creat al principi d'aquest apartat (Veure **Figura 63**).

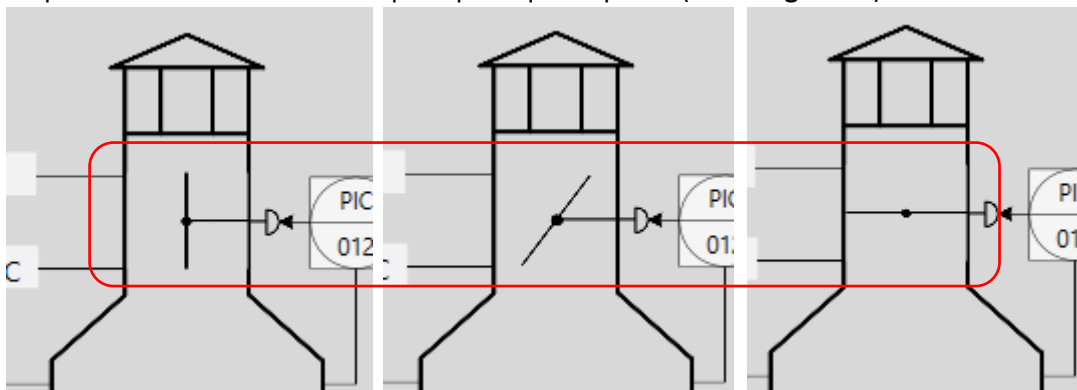


Figura 70: Representació de la vàlvula d'escapament o *damper*. A l'esquerra es troba la vàlvula totalment oberta, al centre parcialment oberta i a la dreta totalment tancada.

- Temperatura ambient: Una altra variable que cal introduir a la pantalla és el control de la temperatura ambient. Aquesta variable, per descomptat, no pot ser controlada ni escollida a voluntat i, per tant, no té sentit aplicar-ho a una pantalla de planta real. Tot i això, a l'hora de formar operadors, és necessari ensenyar l'efecte d'aquest tipus de canvis sobre el comportament del forn amb l'objectiu que compreguin bé els seus efectes. Per aquest motiu, es decideix exportar la temperatura ambient utilitzada a les diferents operacions unitàries amb l'objectiu de poder controlar-la. Per canviar el seu valor es decideix fer servir una barra de nivell, tal com s'ha realitzat amb el mode de treball del forn.
- Temperatura d'entrada al procés: La temperatura d'entrada del producte de procés és una altra variable que l'usuari pot modificar. En aquest cas, l'usuari pot decidir, dins d'un rang segur per al model, la temperatura a la qual entra el producte a escalfar. Per obligar a l'usuari a fer servir aquest rang, es fa servir, de nou, una *Trackbar*.
- Bypass: El bypass tampoc és una variable que normalment es trobi representada a les interfícies gràfiques. Tot i això, per a la correcta formació cal informar del seu estat. Per fer-ho, es decideix incorporar el senyal amb el mòdul Alarm. En aquest cas, quan l'etiqueta està en valor 1, l'alarma passa a tenir escrita la paraula Bypass.
- Flama: Finalment, l'última variable que falta per representar en el sistema és la flama del forn. Com s'ha pogut observar a la **Figura 63**, el forn s'ha representat amb una flama dibuixada. Tot i això, la flama no es troba sempre encesa i és necessari mostrar-ho en pantalla. Per realitzar-ho, es decideix fer un procediment similar al del damper. Es fa servir una alarma de forma que

quan existeix una flama passa a ser transparent. De forma contrària, si no hi ha cap flama, l'alarma passa a ser del mateix color que el fons, tapant completament la flama.

Un cop totes les connexions entre el simulador i la IIS s'han realitzat, cal afegir una sèrie d'eines que permetin enregistrar les dades de les diferents variables per representar-les. Per fer-ho, hi ha un apartat específic al software IIS que permet realitzar-ho. Es decideix representar cinc gràfics diferents en funció del tipus de variable: Temperatura, pressió de gas natural, cabals, pressió de corrent de procés i altres.

Taula 23: Variables que es mostren als diferents gràfics al software IIS

Gràfic	Variables	Unitats
Temperatures	Temperatura de sortida del procés	°C
	Valor de consigna de la temperatura de sortida del procés	°C
	Temperatura de la paret a la zona convectiva	°C
Pressió del combustible	Pressió a la línia de cremadors	bar
	Pressió a la línia de pilots	bar
	Pressió dels gasos de sortida	bar
Cabals	Cabal de combustible	STDm ³ /h
	Cabal de procés	STDm ³ /h
	Cabal d'aire	kg/h
Pressió de la línia de procés	Pressió d'entrada	bar
	Pressió de sortida	bar
Altres	Atmosfera explosiva	%LEL
	Diferència de pressió al forn	mmH ₂ O
	Percentatge de O ₂ als fums de sortida	%O ₂

A causa de la diferència de rang de les diferents variables en un mateix gràfic, es decideix utilitzar diferents eixos dins d'un mateix gràfic. Això encara és més acusat en el cas dels gràfics Altres i Cabals, els quals les variables que es representen tenen unitats diferents.

Finalment, el sistema incorpora un sistema de detecció d'alarmes. La simulació utilitzada ja disposa de diferents alarmes amb l'objectiu d'actuar sobre el sistema en cas de ser necessari. Tot i això, aquest propi sistema permet enregistrar les alarmes que s'han activat durant l'operació, per tal que quedi enregistrat. En aquest cas, cal introduir la variable a controlar, el valor límit, el tipus d'alarma (crítica o d'avís) i si es tracta d'una alarma de valor baix o elevat.

El resultat de realitzar tota aquesta operació és el que es mostra a la **Figura 71**.

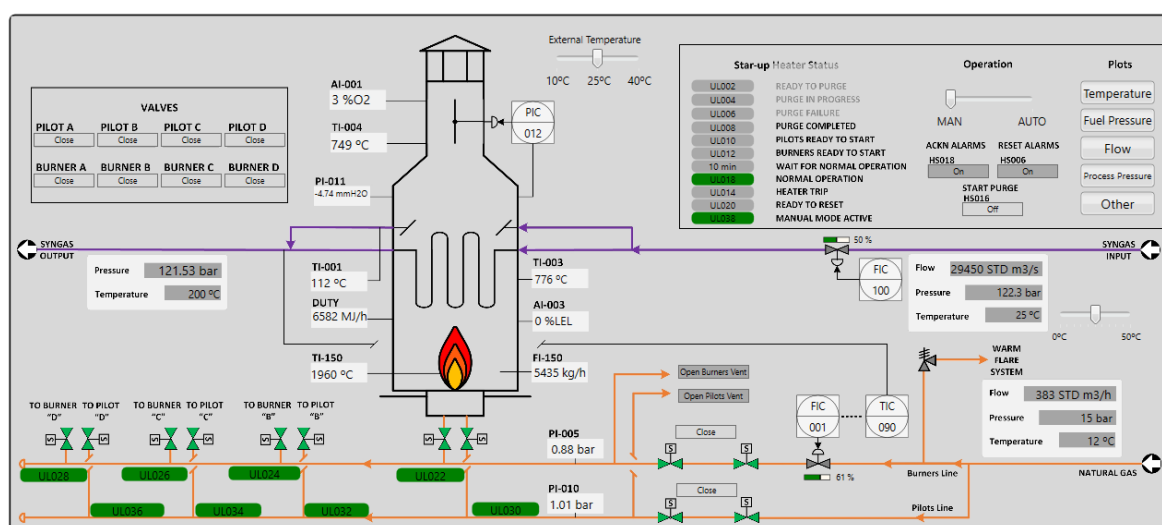


Figura 71: Interfície gràfica al software IIS en funcionament

7.5. Validació de la connexió i del comportament del sistema

Un cop totes les connexions han estat realitzades, és necessari comprovar que realment són funcionals. Per altra banda, manipular el forn mitjançant aquest software és més senzill que fer-ho directament sobre la simulació i, per tant, es realitzarà un control de totes les funcions del sistema (tipus de resposta, seguretat davant d'alarmes crítiques, alarmes ben configurades, etc.).

7.5.1. Connexions

Per a validar les connexions cal realitzar una inspecció directa sobre la informació en pantalla. Cal comprovar que els diferents indicadors funcionen i mostren la informació que els hi correspon. Per altra banda, cal comprovar els diferents *Faceplates* dels controladors, assegurant-se que totes les variables funcionen correctament.

És quan es realitza aquest test que apareix un dels principals problemes de la connexió. Hysys i IIS tenen diferent nomenclatura per al mode de control. A la **Taula 24** es mostra aquesta diferència.

Taula 24: Comparació entre la nomenclatura dels modes a AspenHysys i IIS

Mode	AspenHysys	IIS
Apagat	0	0
Manual	1	1
Automàtic	2	2
Indicador	3	—
Cascada	4	3

Com es pot observar, l'única diferència que pot afectar és el fet que el mode cascada és representat amb un valor diferent de tots dos programes i, per tant, l'únic controlador que té un problema amb aquesta diferència és el FIC001 (control de cabal de combustible). Per solucionar-ho, es proposa en primer lloc fer servir un Spreadsheet que, en el moment que rebí el senyal 3 de l'IIS, posi un 4 en el controlador. Aquesta solució, però, no va donar els resultats esperats. Tot i configurar de forma correcta el controlador, el software IIS enviava de forma contínua el senyal de canviar el mode de treball, fent que el controlador no actués en mode cascada, quedant bloquejat per la gran quantitat de senyals rebuts des de la pantalla. Per tant, es va buscar una solució que permetés arreglar la diferència de la **Taula 24** i, ahora, no bloquegés el controlador. La solució que es va considerar més oportuna va ser utilitzar un *Event Scheduler*. Per a realitzar aquesta seqüència es va pensar en un primer moment a fer servir una seqüència contínua per fer el canvi, de forma que cada cop que el valor

de la IIS era 3, es canviava el mode de treball a cascada. Tot i això, el mode continu tornava a bloquejar el control, degut a que la seqüència continuava enviant de forma contínua la senyal de canviar el mode, impedit el seu correcte funcionament de nou. Per tant, la única solució que va poder realitzar-se era fer servir una seqüència *OneShot*. La principal diferència entre aquests dos modes resideix en que, en el cas del continu, la seqüència es executada sempre que es compleixi la condició (bloquejant el controlador), mentre que en la d'un sol ús això no passa: quan la seqüència és certa, ja no es comprova més cops. Aquesta característica, però, impedia canviar el mode de treball més d'un cop durant la sessió de treball, cosa que realment no hauria de passar. Per tant, la solució que es va realitzar va ser la incorporació de quatre seqüències diferents, tal i com es mostra a la **Figura 72**.

FIC001_OFF	OneShot	Waiting	1	Condition 1	Action List 1
FIC001_MAN	OneShot	Waiting	1	Condition 1	Action List 1
FIC001_AUTO	OneShot	Waiting	1	Condition 1	Action List 1
FIC001_CASC	OneShot	Inactive	1	Condition 1	Action List 1

Figura 72: Seqüències utilitzades per al canvi de mode del controlador FIC001

Cada seqüència està configurada per quedar-se inactiva un cop està en funcionament, per evitar el bloqueig comentat anteriorment i, alhora, activar tota la resta de seqüències. D'aquesta forma, per exemple, quan es canvia el mode de treball de cascada a manual, es parteix de l'estat mostrat a la **Figura 72**. Quan es fa el canvi des de la IIS, la senyal enviada és 1. Aquesta activa la seqüència anomenada FIC001_MAN. El resultat d'aquesta seqüència és canviar el mode de treball a manual, després activar les altres tres seqüències, ja que no es sap quina està inactiva i, finalment, quedar-se ella mateixa inactiva.

Aquest recurs permet realitzar aquest canvi de mode de treball sense els inconvenients comentats anteriorment.

La resta de connexions han estat satisfactòries.

7.5.2. Control de les alarmes

Un cop es comprova que totes les connexions semblen correctes, cal posar a prova la seguretat del sistema, per tal d'assegurar que totes les alarmes s'activen i desactiven de forma coherent amb el que requereix aquest tipus d'operació. Per aquest motiu, es realitzen totes les accions que poden provocar situacions de perill. En primer lloc, es comproven les alarmes d'avís, una a una, donant el resultat esperat.

Un cop aquestes es comprova que tenen un funcionament correcte, es decideix portar el sistema a una situació més perillosa, provocant l'activació de les alarmes crítiques i comprovant que, efectivament, el sistema s'apaga i col·loca totes les vàlvules en la seva posició d'emergència.

7.5.3. Engegar el forn

Per finalitzar, un cop el forn es troba desconnectat a causa de la parada d'emergència, es decideix comprovar que els gràfics i la resposta obtinguda torna a ser estable i que la informació que es mostra en pantalla és correcta. Per realitzar-ho, es decideix comprovar la resposta tant en mode manual com en automàtic, obtenint una resposta estable i una informació correcta en pantalla.

7.6. Conversió del projecte a arquitectura Client – Servidor

Un cop el model està validat i es comprova la qualitat de les connexions, cal preparar el model per poder realitzar la connexió Client-Servidor explicada a l'apartat **Què és un OPC?** Per fer-ho, cal crear dos arxius, un que s'executa a l'estació Server i un altre que s'executa a l'estació Client.

7.6.1. Arxiu Client

En primer lloc, cal obrir l'arxiu i canviar el tipus de connexió de Hysys a *OPCClient*. Aquest tipus de connexió ja no busca els valors a la simulació de Hysys, sinó que els busca al lloc on s'executa la simulació, a l'ordinador que actua com a servidor. Per aquest motiu, cal canviar l'adreça IP a la que tindrà el servidor. Un cop això està configurat, l'arxiu està preparat per executar-se.

7.6.2. Arxiu Servidor

En el servidor cal executar dos arxius alhora. Un és el de la simulació i l'altre l'*OPCServer*. El primer d'ells només necessita executar la simulació i per això s'elimina la pantalla, ja que no necessita executar-la.

Per altra banda, cal indicar quines etiquetes de totes les existents han de ser llegides per la simulació (s'haurà de marcar a cada etiqueta l'opció *Master*). Aquestes variables són els valors PV dels indicadors i controladors i les OP dels controladors automàtics. Els valors dels llums i alarmes també són variables que cal llegir de la simulació.

L'altre arxiu necessita que la connexió sigui canviada a *OPCServer* i, tal com s'ha realitzat amb l'altre arxiu, especificar com a *Master* en aquesta ocasió les etiquetes que no han de ser llegides del simulador, és a dir, les variables que vénen fixades per l'usuari a la pantalla.

Finalment, ambdós arxius necessiten ser connectats entre si per establir una comunicació. Per fer-ho, s'ha de crear un arxiu que els permeti sincronitzar-se. Per crear-lo, cal fer clic al botó *Syncron* de l'IIS i afegir els dos arxius esmentats anteriorment, tal com es mostra a la **Figura 73**.

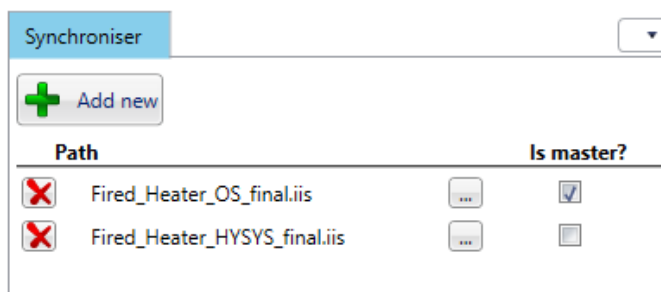


Figura 73: Configuració de la sincronització

8. Documentació de l'OTS

Un cop totes les connexions han estat realitzades correctament, és el moment de preparar la documentació que guiarà a l'operari durant la seva formació en l'operació unitària descrita.

El document consisteix en una petita part introductòria que permet proporcionar els fonaments necessaris sobre l'operació unitària a l'operador. Aquesta part té una alta similitud amb la informació proporcionada en aquest mateix document a l'apartat **Estudi del sistema**.

La resta del document consisteix en nou exercicis que combinen aquesta teoria amb la pràctica que proporciona la simulació. A continuació, s'explica en què consisteixen aquests exercicis i quines capacitats pretenen proporcionar a l'usuari.

Taula 25: Exercicis proposats a la documentació per a l'alumne

Exercici	Descripció/Finalitat
Exercici 1: Cas estacionari	Conèixer l'estat del forn. Comparar radiació i convecció.
Exercici 2: Canvi en el SP de la temperatura de sortida	Conèixer el comportament del sistema en canviar el valor de consigna de la temperatura de sortida.
Exercici 3: Canvi en la temperatura de l'entrada de procés	Veure la influència sobre el comportament del forn quan el compost d'entrada varia la seva temperatura.
Exercici 4: Canvi en el cabal de la línia de procés	Veure la influència del cabal de procés sobre el comportament i la resta de variables implicades en el forn.
Exercici 5: Pèrdues de calor	Entendre la diferència entre treballar amb temperatures externes diferents.
Exercici 6: Canvi de cabal de combustible	Conèixer que existeix una altra forma de canviar el cabal de combustible: de forma manual
Exercici 7: Canvi de l'apertura del <i>damper</i>	Manipulació del cabal d'aire que circula pel forn i entendre els seus efectes.
Exercici 8: Cremadors	Desconnexió de cremadors i els seus efectes.
Exercici 9: Reiniciar el forn	Aprendre com interactuar amb el sistema per engegar-lo de nou

8.1. Exercici 1: Cas en estat estacionari

Aquest exercici és una introducció a la pantalla i al funcionament inicial del sistema. Pretén mostrar l'estat inicial del cas i mostrar com iniciar-lo correctament. En aquest exercici, l'operador ha d'identificar l'indicador que dona aquesta informació i comprovar que coincideixen. L'estat inicial del forn és el mostrat a la **Figura 71** i a la **Taula 26**.

Taula 26: Estat inicial del forn

Pilots encesos	4
Cremadors encesos	4
Mode de control del PIC012	Manual
Mode de control del FIC001	Cascada
Mode de controls del TIC090	Auto
Calor bescanviada	6582 MJ/h
Temperatura d'entrada a la línia de procés	25 °C
Temperatura de sortida del primer pas	112 °C
Temperatura de sortida del segon pas	200 °C
Temperatura de flama	1774 °C
Temperatura de paret	776 °C
Temperatura de la xemeneia	749 °C
Temperatura ambient	25 °C
Pressió de la línia de cremadors	88,27 kPa
Pressió de la línia de pilots	101,5 kPa
Pressió atmosfèrica	79,15 kPa
Flux de gas natural	383 STDm ³ /h (272 kg/h)
Cabal de producte de procés	29450 STDm ³ /h (11530 kg/h)
Mode d'engegada	Manual
Tipus d'operació	Normal operation

Finalment, es planteja un exercici teòric de càlcul a partir de la informació inicial del forn. L'objectiu d'aquest problema és comparar, en les condicions inicials, la calor bescanviada a través de convecció i radiació. A causa de les condicions del forn, el resultat d'utilitzar les fórmules de radiació i convecció indiquen que la calor a través de radiació és clarament superior. Perquè s'entengui millor com afecta realment la temperatura a la radiació, es demana també que realitzin el mateix càlcul quan la temperatura és de 100 °C. En aquest segon cas, el resultat és que el valor de la calor per convecció és 3 cops superior a la de radiació. Aquest exercici permet a l'usuari conèixer les condicions en les quals la radiació és més eficaç i el motiu pel qual en un forn com el descrit és la forma predominant de transferència de calor.

8.2. Exercici 2: Canvi en el SP de la temperatura de sortida

En aquest exercici, es pretén comprendre el funcionament del llaç tancat que controla el combustible per mantenir la temperatura del forn a un valor constant.

Per mostrar aquesta influència, es demana a l'usuari que canviï el valor de consigna (SP) del controlador TIC090 a dues temperatures diferents amb l'objectiu de comparar què succeeix quan es demana un canvi a una temperatura superior i a una temperatura inferior. Aquests canvis permeten que l'usuari pugui comparar l'evolució de les diferents variables.

A més a més, quan s'augmenta massa el valor de consigna, la temperatura de la paret augmenta, activant la seva alarma d'avís (TSH003). L'usuari ha d'explicar el perquè d'aquesta situació.

Amb la informació recollida, l'usuari ha d'explicar el perquè de la resposta del sistema, explicant l'evolució del cabal de combustible, de les diferents pressions que s'observen que varien i les alarmes de temperatura que s'encenen quan s'exigeix major temperatura.

8.3. Exercici 3: Canvi en la temperatura d'entrada del corrent de procés

Una variable que pot afectar el rendiment del sistema és la temperatura en la qual entra la substància de procés en el sistema. Aquest apartat té com a objectiu mostrar a l'usuari l'efecte d'una reducció i d'un augment d'aquesta variable.

Aquest exercici té plantejat un primer problema perquè l'alumne, de forma teòrica i sense manipular la simulació, predient el que s'espera que passi amb el sistema davant d'aquesta pertorbació, mitjançant la fórmula mostrada a (Eq. 8.1).

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T - T_{\infty}) \quad (\text{Eq. 8.1})$$

Un cop l'alumne respon la pregunta, se li indica com realitzar l'operació amb l'objectiu de comprovar si la seva predicció era certa.

Finalment, com que se li demana comprovar que passa en reduir la temperatura 10°C i augmentar-la uns altres 10 °C, l'usuari ha de respondre si observa un comportament lineal en el sistema.

8.4. Exercici 4: Canvis en el cabal de procés

Una altra variable referida a la substància de procés que pot afectar de forma considerable a l'operació de la planta és el cabal que circula. Per aquest motiu, l'operador ha d'explicar com creu que respondrà el sistema davant d'un augment d'aquesta variable i d'un descens. Per fer-ho, pot fer ús de l'equació (Eq. 8.1).

De la mateixa forma que a l'exercici anterior, un cop s'ha predit la resposta, l'usuari ha de realitzar aquest canvi i observar el seu comportament. En aquest cas, quan l'usuari realitza el canvi, se li planteja, de nou, un altre problema. En aquest cas, l'usuari ha d'explicar el motiu pel qual la pressió del forn varia amb el canvi de cabal plantejat. Cal que expliqui la sèrie d'esdeveniment que succeeixen al sistema: La reducció de cabal implica una reducció de combustible, que alhora implica una reducció de temperatura i, per tant, una reducció de cabal d'aire. Com que existeix menys cabal d'aire, hi ha menys pressió a l'interior del forn.

8.5. Exercici 5: Pèrdues de calor

Aquest apartat del manual té com a objectiu mostrar a l'usuari l'impacte de la temperatura ambient en el funcionament del forn.

En primer lloc, l'usuari ha de predir mitjançant l'equació (Eq. 8.2) l'efecte dels canvis a la temperatura ambient (T_{∞}). Un cop l'usuari fa les seves prediccions, es demana que canviï, de cop, la temperatura ambient. El principal motiu per realitzar aquest canvi de forma sobtada és per mostrar de forma gràfica com pot pertorbar aquesta variable el funcionament de tot el forn.

$$q_{loss} = U \cdot A \cdot (T - T_{\infty}) \quad (\text{Eq. 8.2})$$

L'alumne ha de representar en dos gràfics diferents la resposta del sistema i, a partir d'aquests gràfics, explicar el perquè de tot el que succeeix.

Finalment, l'usuari ha d'explicar amb les dades que ha obtingut l'estació de l'any en la que espera que el cost de treballar sigui menor i per què.

8.6. *Exercici 6: Canvi de cabal de combustible*

Tal com s'explica en el manual, el controlador de cabal de combustible (FIC001) pot treballar tant en mode cascada com en mode manual. En aquest apartat, l'usuari ha de manipular aquest controlador de forma manual. Mantenint l'estructura de la resta d'exercicis, el primer que es pregunta en aquest apartat és el resultat que s'espera de realitzar un canvi en l'apertura del sistema. La resposta de l'usuari en aquest apartat és que ha de ser semblant a la que succeeix al segon exercici, ja que finalment, les conseqüències són les mateixes.

La finalitat d'aquest exercici no és mostrar un comportament diferent a l'usuari, sinó que experimenti les diferents formes de manipular el cabal de combustible en el sistema i, finalment, explicar la utilitat que pot acabar tenint realitzar aquesta operació de forma manual. La seva resposta cal que sigui que per engegar el forn no es pot posar el controlador de cabal en mode cascada, ja que el controlador augmentaria de cop l'entrada de gas natural als cremadors.

A més a més, aquest exercici permet comprovar que la quantitat de combustible utilitzat no és proporcional a la calor aportada.

8.7. *Exercici 7: Canvi en l'apertura del 'damper'*

El forn plantejat en aquest projecte és de convecció natural, és a dir, l'entrada i moviment de l'aire a través del forn és degut als canvis de densitat causats per la temperatura. Tot i això, l'usuari pot tenir un control de la quantitat d'aire que permet entrar en el sistema mitjançant la manipulació de la vàlvula d'escapament. La primera pregunta que es planteja en aquest exercici és explicar quin és l'estat d'aquesta vàlvula. Aquesta pregunta pretén mostrar a l'usuari que aquesta vàlvula té un comportament diferent del de la resta i que el seu estat es pot veure directament en la posició mostrada en pantalla. A més a més, com aquesta vàlvula té una posició de fallida oberta, quan el controlador envia una OP de 0%, la vàlvula roman tancada, mentre que quan és de 100%, es tanca. Aquesta característica també es pregunta en el primer problema.

A l'exercici es redueix l'apertura de la vàlvula dos cops. La primera, que manté una apertura major, permet reduir l'excés d'oxigen, augmentant la calor bescanviada. La segona, més tancada, redueix l'excés a zero, impedit una combustió completa i, per tant, reduint considerablement la quantitat d'energia bescanviada en el sistema.

Finalment, l'usuari ha d'explicar que li sembla el funcionament del forn amb aquestes noves condicions i si són bones condicions de treball.

8.8. Exercici 8: Cremadors

Una altra variable que pot intervenir en el sistema és la falta d'algun dels cremadors durant l'operació. La primera pregunta que es realitza en aquest exercici és el pronòstic de l'alumne davant de la falta d'un dels cremadors, és a dir, les conseqüències que s'espera en temperatura i pressions. Realment, l'única conseqüència que es pot observar és un augment en la pressió de la línia, ja que es manté el mateix cabal de gas.

Posteriorment, l'alumne ha de realitzar aquesta operació i comprovar si les seves expectatives es compleixen. Tot i això, el següent problema que es planteja és si l'alumne s'atreveix a extrapolar els resultats de tancar un cremador a tancar-ne dos. Lògicament, i tal com s'explica, la falta de dos cremadors és motiu per parar el forn immediatament i l'alumne ha de saber-ho. Tot i això, se li demana que ho realitzi. Quan això passa, l'usuari ha de dibuixar l'evolució de les temperatures per entendre que ha passat i veure clarament les conseqüències d'aquestes accions.

Per últim, com el forn està apagat per emergència, les vàlvules es troben en la seva posició de fallida i ignorant els senyals de botons i controladors. Per això mateix, aquesta situació és una de les preguntes que es realitza a l'usuari.

8.9. Exercici 9: Reinici del sistema

Finalment, l'últim exercici que es planteja a l'usuari és reiniciar el sistema que a l'exercici anterior queda apagat. Aquest exercici inicialment només va ensenyant com reiniciar el sistema, sense realitzar preguntes en aquesta primera part. El primer problema que es planteja és teòric i consisteix a explicar la necessitat de purgar i explicar les diferències que es veuen en el forn durant aquest procés. Posteriorment, l'alumne ha d'engegar els diferents pilots, a poc a poc i esperant la confirmació de flama. En aquest punt, es realitza una pregunta a l'usuari relacionada amb les llums del panell. La pregunta consisteix en el nombre de pilots necessaris perquè el panell t'indiqui que els cremadors poden posar-se en marxa (Veure **Figura 74**). Per respondre aquesta pregunta l'usuari ja ha experimentat que passava quan el sistema treballava amb tres i amb dos cremadors.

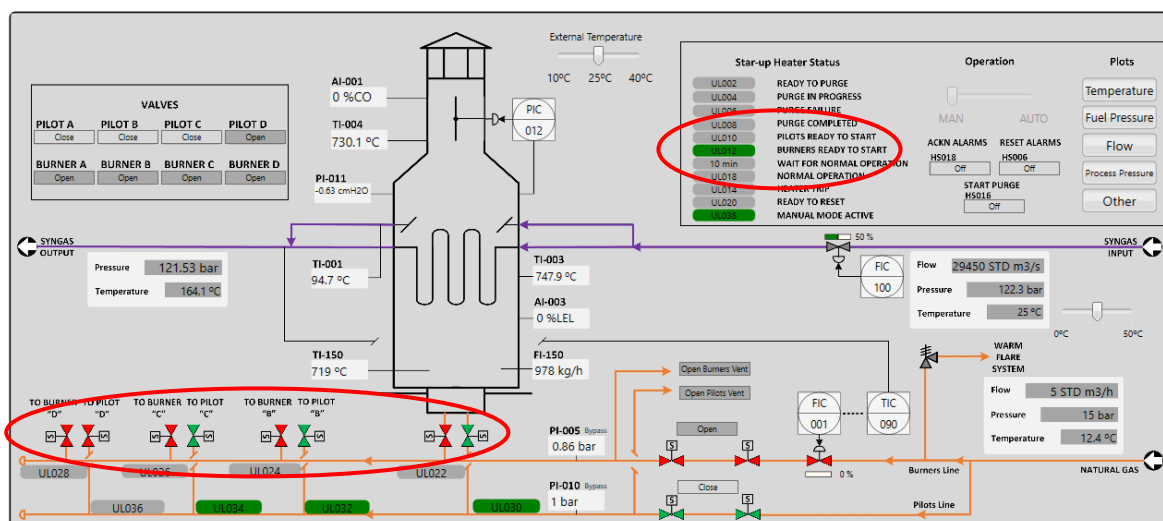


Figura 74: Nombre de pilots amb els quals el panell del forn indica que els cremadors poden ser encesos

Un cop els cremadors treballen, es demana a l'usuari que pressuritzï la línia de cremadors. És en aquest punt on se li demana que expliqui per què en aquest cas no pot controlar-se el cabal de combustible mitjançant el mode cascada del controlador FIC001. L'exercici **Exercici 6: Canvi de cabal de combustible** ja plantejava el per què d'aquesta necessitat.

Un cop la línia es pressuritza, s'obre el primer cremador. Aquesta situació activa l'alarma crítica de pressió baixa a la línia de cremadors tot i que no afecta el funcionament del forn. Això permet preguntar-li a l'usuari per què no s'encén l'alarma *Heater trip* que hauria de fer apagar tot el sistema de nou. La raó d'això és que aquesta alarma té un bypass i, per tant, no afecta que en aquesta situació no hi hagi una elevada pressió, ja que el que pretén aquesta alarma és evitar un mal funcionament dels cremadors. Com es pot observar a la **Figura 75**, el bypass està indicat al costat del nom de l'indicador.

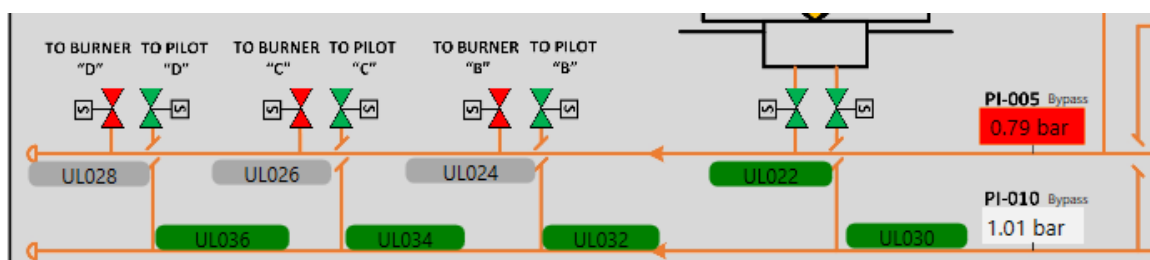


Figura 75: Alarma de pressió baixa (PSLL005) activa i amb bypass

Finalment, es demana a l'usuari que acabi d'engegar la resta del forn i que representi la resposta que obté de les diferents temperatures.

9. Anàlisi de l'impacte ambiental

L'impacte mediambiental que implica aquest projecte es pot quantificar en dos vessants diferents. Per una banda, es pot quantificar l'impacte implicat durant la realització del projecte i per altra, l'impacte d'utilitzar el producte obtingut.

Com s'ha observat, la realització d'aquest projecte és completament d'oficina. Això vol dir que mediambientalment no es tracta d'un projecte que generi altes quantitats de residus. La major part de l'impacte del projecte resideix en el consum elèctric utilitzat. L'ordinador utilitzat té una potència de 90 W. Per a calcular el consum elèctric generat, cal multiplicar aquest valor pel nombre d'hores del projecte. A l'apartat **Anàlisi Econòmica** es mostra que el nombre total d'hores involucrades en el projecte és de 655 hores.

$$\text{Consum elèctric (kWh)} = \text{Potència (kW)} \cdot \text{Temps d'ús (h)} \quad (\text{Eq. 9.1})$$

$$\text{Consum elèctric} = 90 \text{ W} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} \cdot 655 \text{ h} = 59 \text{ kWh} \quad (\text{Eq. 9.2})$$

Si es considera el factor d'emissió associat a l'energia elèctrica de l'any 2017 com a vàlid (16), s'obté la informació de la **Taula 27**.

Taula 27: Impacte mediambiental de la realització del projecte

	Factor d'emissió	Consum elèctric	Impacte mediambiental
Ordinador	0,392 kg CO ₂ /kWh	59 kWh	23,13 kg CO₂

Per altra banda, la utilització de l'OTS implica la necessitat que cada alumne utilitzi un ordinador. Per aquest motiu, cal quantificar mitjançant l'equació (Eq. 9.1) el consum que tindrà cada usuari. Per fer-ho, cal saber que el curs és completa en 8 hores i es considera que la potència dels ordinadors és també de 90 W.

$$\text{Consum elèctric} = 90 \frac{\text{W}}{\text{persona}} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} \cdot 8 \text{ h} = 0,72 \frac{\text{kWh}}{\text{persona}} \quad (\text{Eq. 9.3})$$

Taula 28: Impacte mediambiental de l'ús del producte resultant del projecte

	Factor d'emissió	Consum elèctric	Impacte mediambiental
Ordinador	0,392 kg CO ₂ /kWh	0,72 kWh/persona	0,28 kg CO₂/persona

Com es pot observar, aquest consum es calcula per persona, ja que el nombre d'alumnes del curs depèn de l'empresa client que ho sol·liciti.

Tot i això, no tot l'impacte mediambiental involucrat en el projecte és negatiu. Tal com s'ha comentat en diversos apartats anteriors, l'objectiu d'aquest projecte és formar els operadors. Per tant, una conseqüència indirecta de la realització d'aquest projecte és l'increment de la seguretat de les plantes industrials reals, mitjançant la correcta formació teòrica i pràctica dels diferents operadors de planta, fent servir una simulació que no posa en risc la seguretat i contribuint en la reducció del nombre d'accidents que aquest tipus d'instal·lacions han patit al llarg de la història.

Per finalitzar, si es realitza un balanç global entre l'impacte negatiu i l'impacte positiu del projecte en qüestió, és evident que existeixen més avantatges que desavantatges mediambientals per la seva realització i, per tant, és una pràctica necessària en el sector per assegurar que la gràfica mostrada a l'apartat **Anàlisi del problema (Figura 2: Evolució del nombre d'accidents mortals a Espanya en el període de 1986-2015 (3))** mantingui la tendència descendent per als pròxims anys.

10. Anàlisi Econòmica

L'anàlisi de costos de la realització d'aquest projecte es pot desglossar en tres apartats diferents: Costos de personal, costos de hardware i costos de software.

A continuació, a la **Taula 29** es mostra un resum dels costos totals de la realització del projecte.

Taula 29: Resum de les despeses del projecte

	Cost
Costos de personal	12.196,10 €
Costos de hardware	52,03 €
Costos de software	14.982,38 €
Altres costos	10,03 €
Total	27.240,54 €

Per a calcular els costos de la realització d'aquest projecte és necessari conèixer les hores destinades a la seva realització. Aquesta informació es troba representada a la **Figura 76**.

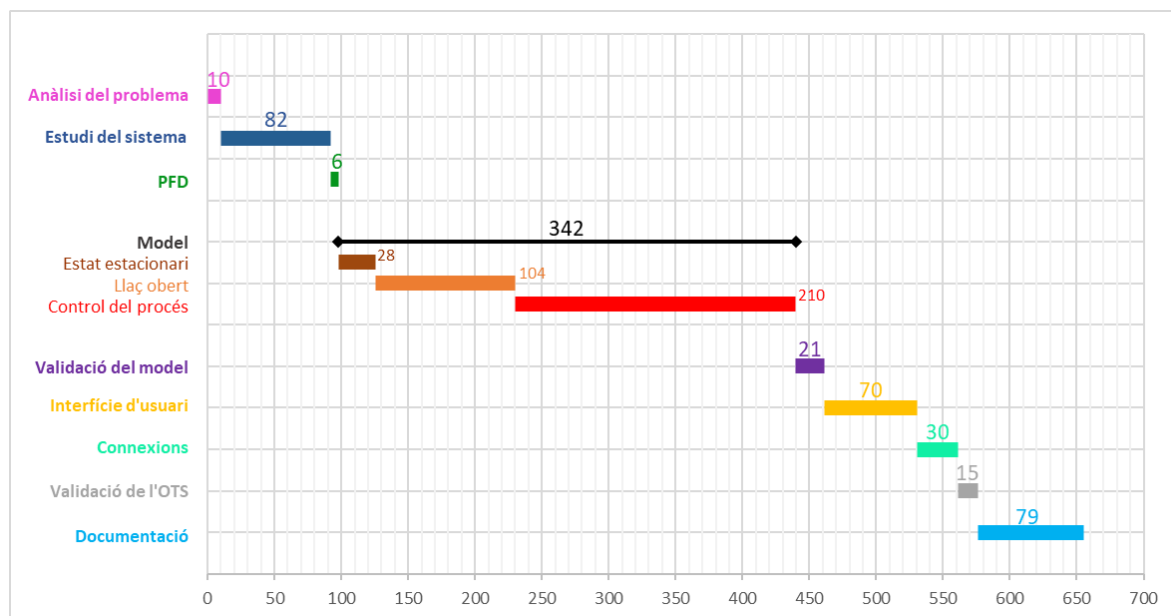


Figura 76: Repartiment d'hores en la realització del projecte

En els subapartats mostrats a continuació es mostren els detalls d'aquests costos.

10.1. Costos de personal

Totes les hores realitzades corresponen a un treball d'enginyer consultor, el qual té un sou mitjà aproximat de 14 €/h. El cost que cal aportar a la seguretat social és del 33%. Amb tota aquesta informació, els costos de personal són els mostrats a la **Taula 30**.

Taula 30: Costos de personal del projecte

	Hores	Cost per hora	Cost
Enginyer consultor	655 h	14,00 €/h	9170,00 €
Seguretat social		4,62 €/h	3026,10 €
Total (€)			12.196,10 €

10.2. Costos de hardware

Per altra banda, per a la realització del treball és necessari fer ús d'eines informàtiques, amb el corresponent cost que això implica. Tot i això, l'ordinador utilitzat no és d'un sol ús i per tant cal tenir en compte la seva amortització. Per calcular-la, cal assumir una amortització de 5 anys. Les hores de treball en un any es consideren 1760 h/any. A la **Taula 31** es mostren els costos de hardware.

Taula 31: Costos de hardware del projecte

	Hores	Cost unitari	Amortització	Cost
Ordinador	655 h	577,69 €	5 anys (8800 hores)	43,00 €
IVA (21%)				9,03 €
Total (€)				52,03 €

10.3. Costos de software

En el cas dels costos de software, cal especificar el temps d'ús de la llicència. Aquest temps depèn del software utilitzat. Cal esmentar que el software *Inprocess Instructor Station* no té cap cost directe a l'empresa, ja que es tracta d'un software propi. Cal recordar que el nombre d'hores laborables en un any és de 1760 h/any.

Els costos de les llicències dels productes Office s'han extret de la seva pàgina web (17) i el d'AspenHysys mitjançant la informació proporcionada per *Inprocess Technology And Consulting Group*.

Taula 32: Costos de software del projecte

	Hores	Cost de la llicència	Durada de la llicència	Cost
AspenHysys		33.057,85 €	1 any	12.302,78 €
Office 365	655 h	87,27 €	1 any	32,48 €
Microsoft Visio		125,95 €	1 any	46,87 €
<i>Inprocess Instructor Station</i>		—	—	—
Total (sense IVA)				12.382,13 €
IVA (21%)				2600,25 €
Total (€)				14.982,38 €

10.4. Altres costos

Durant la realització del projecte, s'ha fet servir el hardware indicat. Aquest té un consum energètic que cal tenir en compte a l'hora de considerar els costos de realització del projecte. El cost del kWh utilitzat és el proporcionat per l'empresa Endesa al seu portal web (18). La quantitat d'energia consumida es troba a l'equació (Eq. 9.2). El cost d'aquesta energia es representa a la **Taula 33**.

Taula 33: Altres costos del projecte

	Consum elèctric	Cost per kWh	Cost
Energia	59 kWh	0,140439 €/kWh	8,29 €
IVA (21%)			1,74 €
Total (€)			10,03 €

Conclusions

Un cop el projecte ha estat realitzat, les conclusions obtingudes són les següents:

- S'ha simulat el procés descrit en estat estacionari, dinàmic en llaç obert i dinàmic en llaç tancat.
- S'ha comprovat l'estabilitat de la simulació mitjançant pertorbacions, les quals no han aconseguit desestabilitzar-lo.
- S'ha realitzat la connexió entre la simulació i la interfície gràfica.
- S'ha configurat la interfície gràfica mitjançant OPC de forma versàtil, és a dir, pot connectar-se a diferents simuladors o directament a la planta.
- S'ha redactat la documentació necessària per a poder formar els operadors de planta en el funcionament d'un forn de combustió i mitjançant l'OTS d'aquest projecte.

Per tant, aquest projecte permet la correcta formació dels operadors en el funcionament dels forns de combustió. Aquest permet a l'empresa Inprocess Technology And Consulting Group augmentar el ventall d'operacions unitàries disponibles per a la formació d'operadors a la indústria química i, a més a més, serveix per a poder continuar el desenvolupament dels seus programes OTS i oferir simulacions més específiques per a la formació dels operadors en una planta concreta.

Per altra banda, permet que les empreses que contractin aquest programa de formació puguin augmentar el nivell de formació dels seus treballadors, evitant males decisions que puguin originar pèrdues a l'empresa o, en el pitjor dels casos, accidents que posin en risc la seguretat de la instal·lació o de les persones.

Aquest treball dona un pas més en el nivell de seguretat de les plantes industrials, completant la formació en una operació unitària comuna i no disponible fins a la realització d'aquest projecte.

Bibliografia

1. Ortega, M. i García, Á. *Introducción a la simulación de sistemas discretos*. 2006.
2. Moncho, A.C. *MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS COMPLEJOS*. 2008. ISBN 9788437071985.
3. Accidentes laborales 2015 (2/3). Análisis de los accidentes mortales. A: [en línia]. 2016. [Consulta: 20 març 2018]. Disponible a: <https://www.aepsal.com/accidentes-laborales-2015-mortales/>.
4. COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES. A: [en línia]. 2007, Disponible a: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0062:FIN:ES:PDF>.
5. McCabe, W.L., Smith, J.C. i Harriott, P. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Séptima ed. Mexico: McGraw Hill, 2007. ISBN 9789701061749.
6. Bishop, N. i Sheppard, D. Role of fired heater safety systems. A: [en línia]. 2013. Disponible a: <http://www.emerson.com/documents/automation/role-of-fired-heater-safety-systems-en-38012.pdf>.
7. José et al. *Simulación de Procesos con Aspen Hysys 2006* [en línia]. Disponible a: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817066/93/CursoBasicodeSimulaciondeProcesosconAspenHysys2006.5.pdf>.
8. National Institute of Standards and Technology. NIST Webbook. A: [en línia]. [Consulta: 30 abril 2018]. Disponible a: <https://webbook.nist.gov/>.
9. Inprocess Technology And Consulting Group. *DYNAMIC PROCESS SIMULATION*. 2017.
10. Dutta, S. et al. Supervision of control valve characteristics using PLC and creation of HMI by SCADA. A: [en línia]. 2014. Disponible a: <https://www.semanticscholar.org/paper/Supervision-of-control-valve-characteristics-using-Dutta-Sarkar/472116e29f6e3f9dbabb3759a36f4df5848e9077>.
11. Brogan, R.J. SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS. A: [en línia]. Disponible a: <http://www.thermopedia.com/es/content/1121/>.
12. Stephen Mraz. Differences Between Field, Control, Supervisory, and Enterprise Levels of Automation. A: [en línia]. 2017. [Consulta: 1 maig 2018]. Disponible a: <http://www.machinedesign.com/industrial-automation/differences-between-field-control-supervisory-and-enterprise-levels-automation>.
13. LEL (Lower Explosive Limit) for calibration gas. A: [en línia]. 2015. [Consulta: 10 abril 2018]. Disponible a: <https://www.shopcross.com/smart/lel-lower-explosive-limit>.
14. OPC FOUNDATION. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <https://opcfoundation.org>.

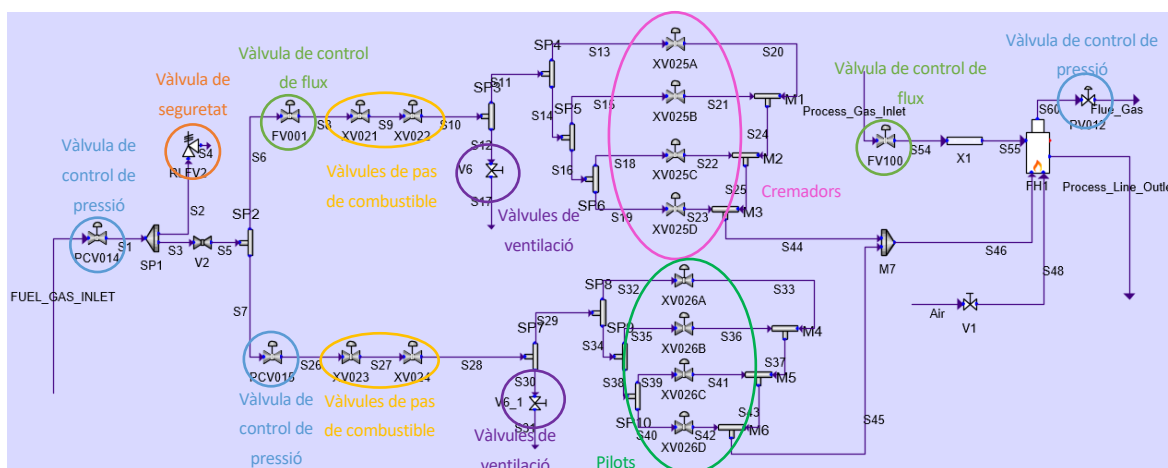
15. Kominek, D. OPC: ¿De qué se trata, y cómo funciona? A: [en línia]. 2009, Disponible a: http://www.infoplc.net/files/documentacion/comunicaciones/infoplc_net_guia_para_entender_la_tecnologia_opc.pdf.
16. Generalitat de Catalunya. Factor de emisión asociado a la energía eléctrica: el mix eléctrico. A: [en línia]. 2018. [Consulta: 14 maig 2018]. Disponible a: http://canviclimatic.gencat.cat/es/reduceix_emissions/com-calculer-emissions-de-geh/factors_demissio_associats_a_lenergia/.
17. Microsoft Products. A: [en línia]. [Consulta: 14 maig 2018]. Disponible a: <https://products.office.com/es-ES>.
18. Endesa. A: [en línia]. [Consulta: 14 maig 2018]. Disponible a: <https://www.endesa.com/es.html>.

Annex A: Simulació en VMGSim

Un dels objectius del projecte ha estat la realització d'un sistema versàtil que permetés la connexió de l'OTS amb qualsevol altra simulador comercial. Per aquest motiu, com a treball addicional, s'ha intentat simular el mateix forn del projecte amb VMGSim.

A1. Simulació en estat estacionari

Els requeriments del forn són els mateixos que es van mostrar a la **Taula 8** i **Taula 9**. Amb les dades mostrades a les taules anteriors, es simula l'estat estacionari de la planta. Un cop l'estat estacionari està simulat es procedirà a canviar la modelització a estat dinàmic.



A-Figura 1: Simulació del sistema en estat estacionari

Com es pot observar, la simulació en estat estacionari és pràcticament igual al cas simulat en AspenHysys, mantenint exactament el mateix diagrama de procés.

A2. Simulació en estat dinàmic (llaç obert)

Un cop el sistema es troba simulat en estat estacionari, és moment de treballar en estat dinàmic. Per això, cal acabar de configurar les diferents operacions unitàries utilitzades.

Com que a l'apartat d'AspenHysys ja s'ha explicat cada zona per separat, en els pròxims apartats s'explica com s'ha configurat cadascun dels mòduls utilitzats.

- Vàlvules: Les vàlvules tenen una configuració semblant a la que disposa AspenHysys. Permeten configurar la característica de la vàlvula, la Cv, la posició de fallida, i el volum, tal i com es mostra a la **A-Figura 2**.

The screenshot displays the VMGSim software interface for configuring a valve. At the top, a process flow diagram shows a valve symbol between two streams, S6 and S8. Below this, the software has several tabs: Summary, Curves, Nozzles, Holdup, Equilibrium Results, Report, and Notes. The 'Main Data' section is expanded, showing a table with the following parameters and values:

Name	Value
Delta P [kPa]	1065.48084
Cv	8.00
Characteristic	EqualPercentage
% Opening [%]	70.000
Valve Cv At Opening	2.74
Mass Flow [kg/h]	396.00
In Vol Flow [m3/h]	36.594
Is Choked	<input type="checkbox"/>

The 'Actuator' section is also expanded, showing a table with the following parameters and values:

Name	Value
% Opening [%]	70.000
Actual Position [%]	70.000
Actuator Type	Hybrid
Actuator Direction	Normal
Time Constant [s]	2.00
Stroke Time [s]	2.00
Time Constant Open [s]	
Stroke Time Open [s]	
Dead Band [%]	0.000
Low Limit [%]	0.000
High Limit [%]	100.000
Bias [%]	0.000
Actuator Fail Position	FailClosed
Actuator Failed	Normal

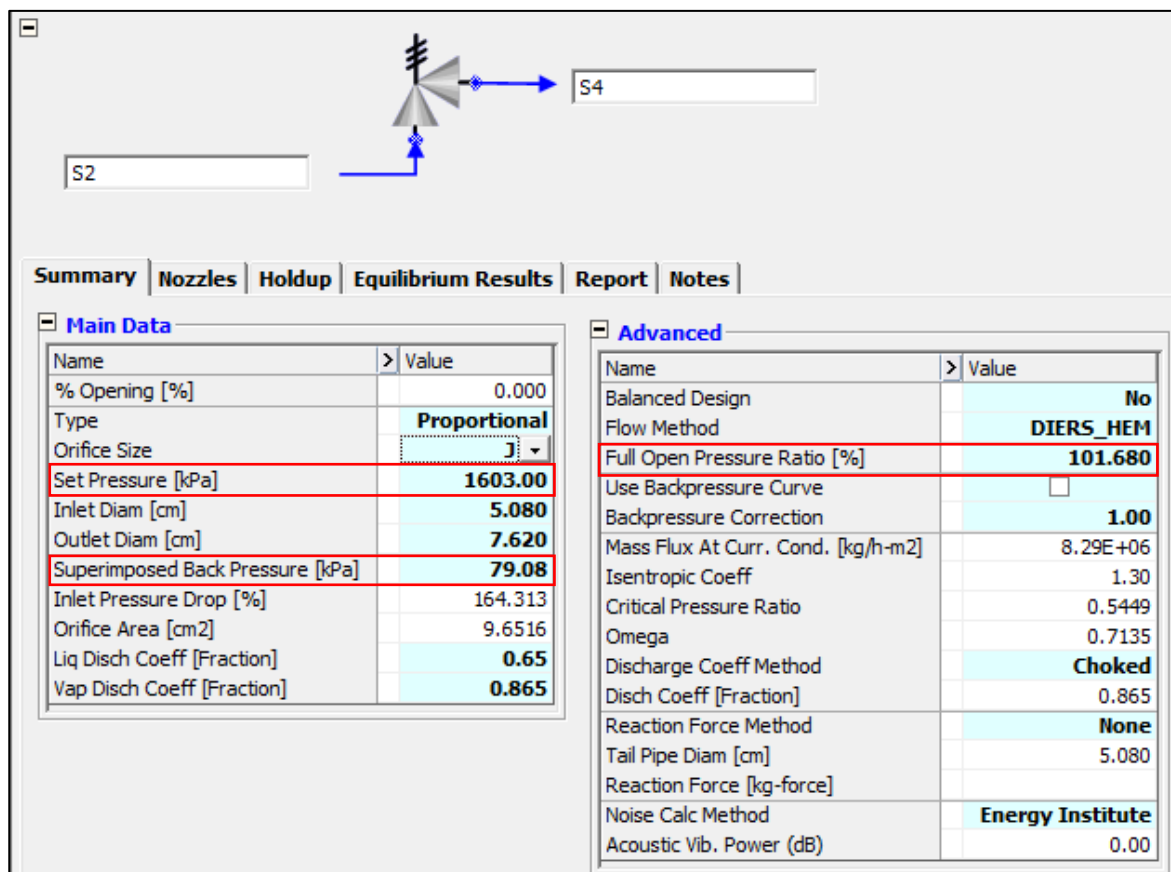
The 'Advanced' section is expanded, showing a table with the following parameters and values:

Name	Value
Noise Calc Method	Energy Institute
Acoustic Vib. Power (dB)	116.68
Volume [m3]	0.280
Check Valve	<input type="checkbox"/>
Check Vlv dP To Open [kPa]	1.00
Cg	276.61
Equiv K	222.59
Use Short Reducer	<input checked="" type="checkbox"/>
Choke Vap. Only	<input type="checkbox"/>
Boiling Delay Model	<input checked="" type="checkbox"/>
Boiling Delay Exponent	0.6000
Choke Coef Calc	Hybrid
Isentropic Coeff	1.29

At the bottom left, there is a 'Print' button. At the bottom right, there is an 'Ignored' checkbox.

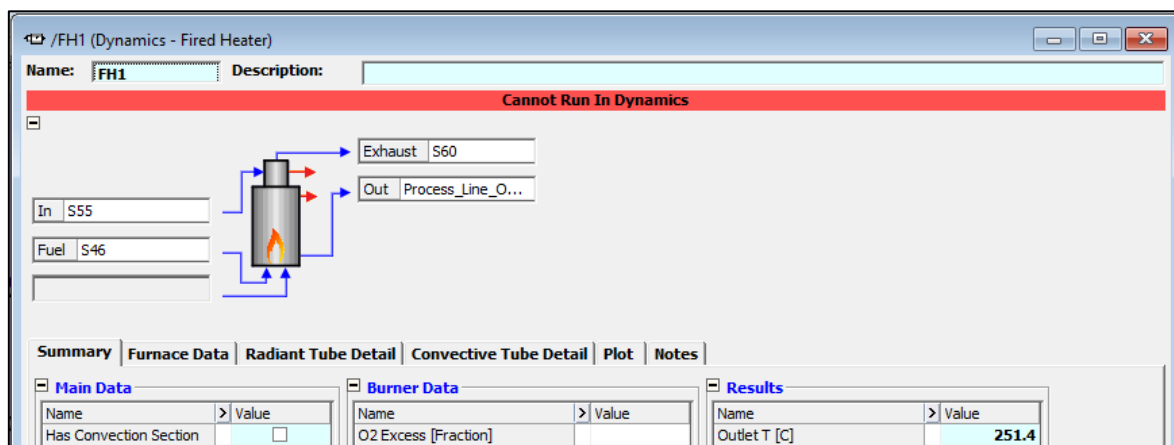
A-Figura 2: Configuració de les vàlvules a VMGSim

- Relief Valve: La vàlvula de seguretat per a sobrepressió té una configuració lleugerament diferent de la de l'altre simulador. En aquesta ocasió, cal seleccionar la pressió a partir de la qual la vàlvula s'obre (Set pressure) i el percentatge de sobrepressió que fa que la vàlvula quedi completament oberta. La resta de variables no és necessari modificar-les. A la **A-Figura 3** es mostra aquesta configuració.



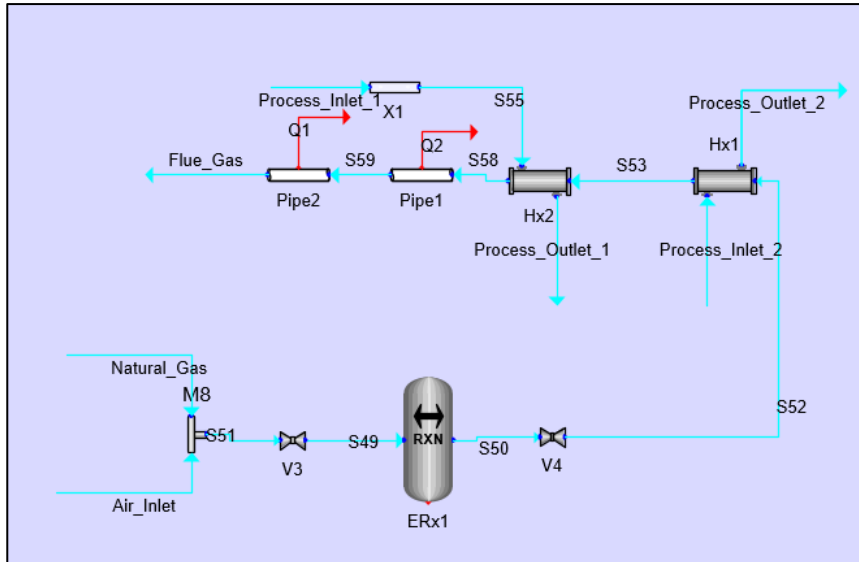
A-Figura 3: Configuració de la Relief Valve a VMGSim

- Fired Heater: A VMGSim, el mòdul Fired heater no està preparat per ser operat en dinàmic i, per tant, cal implementar el mateix sistema que es va implementar a l'altre simulador. A la A-Figura 4 es mostra la seva configuració.



A-Figura 4: Missatge al mòdul *Fired Heater* en mode dinàmic

Per tant, de la mateixa forma que es va fer a l'altre software, se simularà el comportament del forn mitjançant una combinació d'operacions unitàries reunides en un subflowsheet. Per configurar aquest mòdul és necessari realitzar tot el muntatge amb corrents independents. Un cop tot està configurat amb dins de l'espai del subflowsheet, cal connectar els extrems amb els corrents PFD principal.

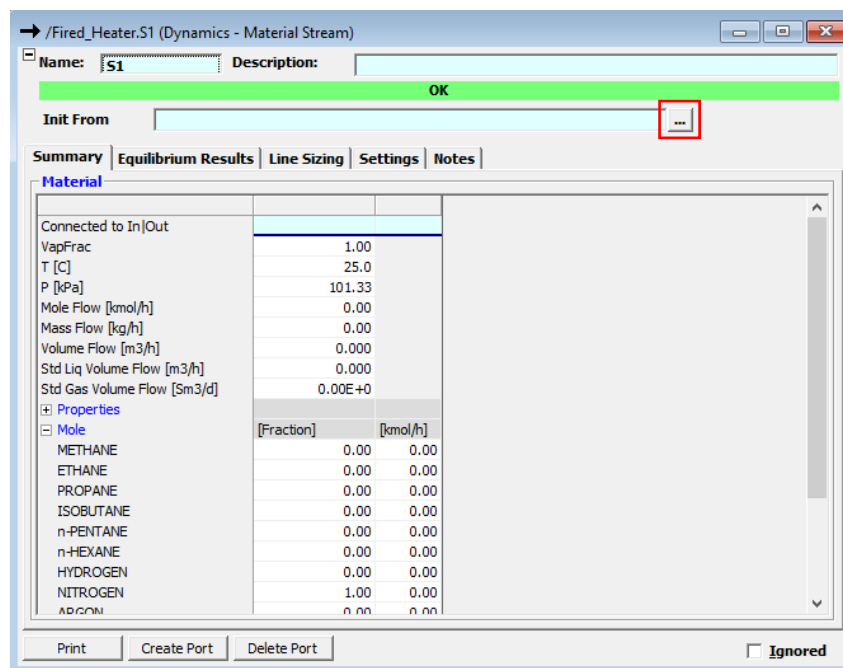


A-Figura 5: Configuració a VMGSim del subflowsheet

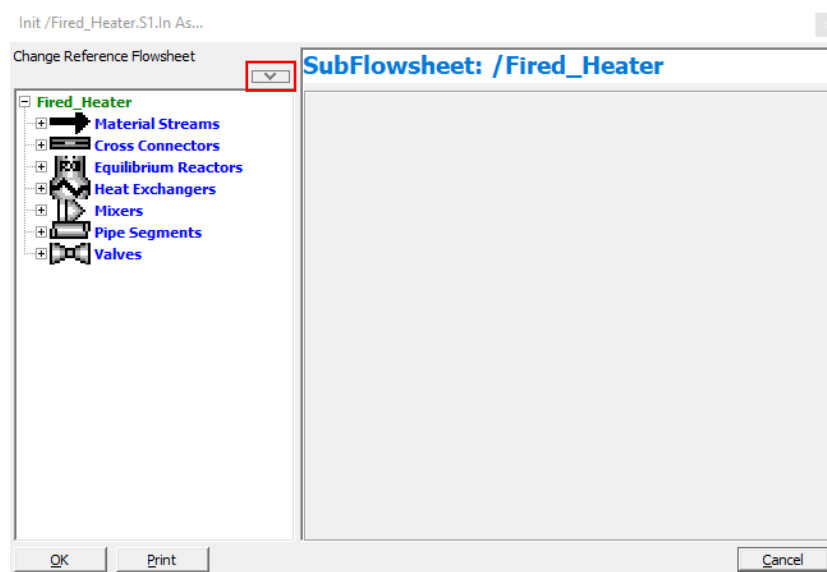
Tal com s'observa, la distribució i el sistema construït ha estat el mateix que a l'altre software. Un cop tot el procés està simulat, cal afegir la connexió amb el diagrama principal. Per fer-ho, cal afegir les connexions als corrents extrems. Les entrades necessiten connectar-se al diagrama extern mentre que les sortides han d'exportar-se al diagrama principal. Per connectar, cal pulsar sobre la secció [...] mostrada als mòduls de les corrents (Veure **A-Figura 6**). A partir de la finestra que s'obre, cal canviar el flowsheet de referència i seleccionar la connexió (Veure **A-Figura 7**).

Quan tots els corrents tenen feta aquesta connexió, la simulació dinàmica en llaç obert està finalitzada.

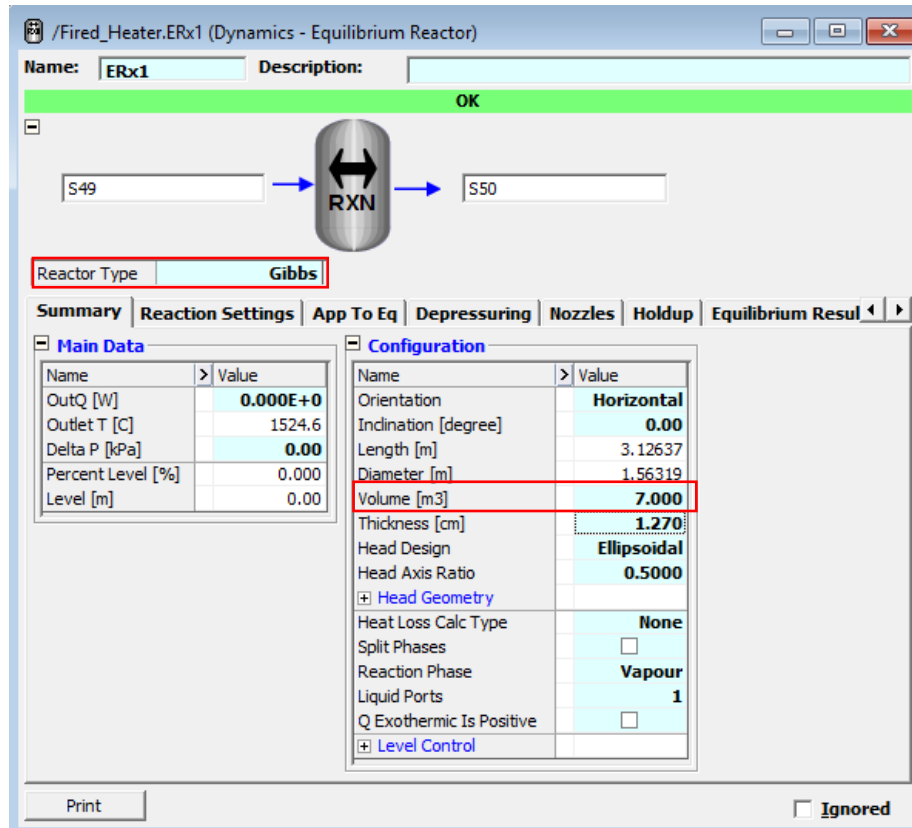
- **Reactor de Gibbs:** El reactor de Gibbs se simula mitjançant un reactor d'equilibri. Dins de la configuració d'aquest reactor, cal especificar el tipus a Gibbs. Finalment, cal afegir que el volum és de 7 m³, tal com es mostra a la **A-Figura 8**.



A-Figura 6: Corrent d'exemple a connectar amb el PFD principal



A-Figura 7: Finestra per escollir l'origen de la connexió



A-Figura 8: Configuració del reactor d'equilibri per actuar com a reactor de Gibbs

- Intercanviadors de calor: En aquesta ocasió el mòdul de bescanviadors a VMGSim està menys desenvolupat que a AspenHysys. La configuració d'aquest mòdul en dinàmic no permet simular un model detallat de l'operació, donant com a resultat una velocitat d'adquisició de temperatura pràcticament instantània.

Com que aquest no és el comportament del sistema descrit, es planteja com a solució aplicar un retard a la temperatura de sortida del reactor de Gibbs. Aquest retard hauria de permetre que la temperatura de sortida del reactor augmentés lentament, simulant el temps que triga el compost a escalfar-se.

Tot i això, el software no conté tampoc un mòdul que permeti afegir aquest retard i, per tant, no és possible simular en aquestes condicions el comportament real.

Per tant, davant de la impossibilitat de simular de forma més detallada el comportament de les temperatures, es decideix aturar el desenvolupament en VMGSim a causa de la falta de temps per continuar investigant possibles solucions.

A3. Conclusions de la simulació amb VMGSim

Tot i que s'ha intentat realitzar la simulació amb VMGSim per comprovar els resultats de la connexió, la seva simulació no és objecte d'aquest projecte. Per això, es decideix no continuar amb la simulació amb aquest software. A més a més, existeixen altres mancances com l'absència de portes lògiques que dificultarien la simulació.

Totes aquestes mancances no signifiquen que el software no sigui capaç de realitzar aquestes operacions, sinó que en el grau de maduresa actual, la simulació de les diferents operacions es complica, sobrepasant l'abast d'aquest projecte.

Per tant, les conclusions amb VMGSim són les següents:

- No s'ha pogut comprovar la connexió de l'OTS amb VMGSim perquè la planta no ha pogut simular-se amb el nivell de detall exigít a la indústria.
- VMGSim, tot i haver avançat en els últims anys les seves capacitats, encara està en desenvolupament i, per tant, encara hi ha casos en els quals no es pot realitzar una simulació prou acurada de la realitat.